

**ANALISIS RUGI DAYA SISTEM DISTRIBUSI DENGAN
PENINGKATAN INJEKSI JUMLAH PEMBANGKIT TERSEBAR**

**SKRIPSI
KONSENTRASI TEKNIK ENERGI ELEKTRIK**

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
Memperoleh gelar Sarjana Teknik



Disusun Oleh :
RIZKI TIRTA NUGRAHA
NIM. 0710633007 - 63

KEMENTERIAN PENDIDIKAN DAN KEBUDAYAAN

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

FAKULTAS TEKNIK

MALANG

2014

LEMBAR PERSETUJUAN

ANALISIS RUGI DAYA SISTEM DISTRIBUSI DENGAN PENINGKATAN INJEKSI JUMLAH PEMBANGKIT TERSEBAR

SKRIPSI KONSENTRASI TEKNIK ENERGI ELEKTRIK

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



Disusun oleh :

RIZKI TIRTA NUGRAHA
NIM. 0710633007-63

Telah diperiksa dan disetujui oleh :

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

Hadi Suvono, ST., MT., Ph.D.
NIP. 19740520 200801 1 013

Dr. Rini Nur Hasanah, ST., M.Sc.
NIP. 19680122 199512 2 001

LEMBAR PENGESAHAN

ANALISIS RUGI DAYA SISTEM DISTRIBUSI DENGAN PENINGKATAN INJEKSI JUMLAH PEMBANGKIT TERSEBAR

SKRIPSI KONSENTRASI TEKNIK ENERGI ELEKTRIK

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik

Disusun oleh :

RIZKI TIRTA NUGRAHA
NIM. 0710633007-63

Skripsi ini telah diuji dan dinyatakan lulus pada
tanggal 12 Agustus 2014

Majelis Penguji :

Ir. Teguh Utomo, MT.
NIP. 19650913 1997103 1 003

Mahfudz Shidiq, Ir., MS.
NIP. 19580609 198703 1 003

Hari Santoso, Ir., MS.
NIP. 19531205 198503 1 001

Mengetahui,
Ketua Jurusan Teknik Elektro

M. Aziz Muslim, ST., MT., Ph.D.
NIP. 19741203 200012 1 001

KATA PENGANTAR

Segala puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT karena hanya dengan berkat rahmat dan hidayahNya penulis dapat menyelesaikan penelitian ini dengan judul “Analisis Rugi Daya Sistem Distribusi Dengan Peningkatan Injeksi Jumlah Pembangkit Tersebar”. Penelitian ini disusun dalam rangka untuk memenuhi persyaratan memperoleh gelar Sarjana Teknik di Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.

Penelitian ini membahas tentang analisis dampak dari peningkatan injeksi jumlah pembangkit tersebar. Dampak yang ditimbulkan membahas tentang pengurangan nilai rugi-rugi daya dan kenaikan level tegangan sistem. Penelitian ini dilakukan pada penyulang Dampit yang berada dibawah operasional unit pelayanan jaringan (UPJ) Dampit Kabupaten Malang.

Dalam menyelesaikan penelitian ini, banyak kendala yang dihadapi oleh penulis, namun berkat bantuan dari beberapa pihak secara moril dan materil sehingga penelitian ini dapat terselesaikan. Oleh karenanya penulis mengucapkan terima kasih kepada :

1. Bapak M. Aziz Muslim, ST., M.Sc., Ph.D selaku ketua Jurusan Teknik Elektro.
2. Bapak Hadi Suyono, ST., MT., Ph.D. selaku Pembimbing I dan Ibu Rini Nurhasanah ST., M.Sc., Ph.D. selaku pembimbing II.
3. Bapak Ir. Teguh Utomo., MT selaku dosen penasehat akademik
4. Ibu, Bapak, dan Keluarga tercinta atas segala bentuk perhatiannya.
5. Teman-teman jurusan teknik elektro Universitas Brawijaya, terkhusus rekan-rekan mahasiswa Teknik Tenaga Elektrik angkatan 2007.
6. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu yang memberikan perhatiannya sehingga skripsi ini dapat terselesaikan dengan baik.

Dalam penyusunan penelitian ini, Saya mengakui masih banyak kekurangan, baik dari segi kualitas penelitian maupun tata tulisnya. Akhir kata semoga penelitian ini dapat bermanfaat bagi kita semua.

Malang,... Agustus 2014

Rizki Tirta Nugraha



DAFTAR ISI

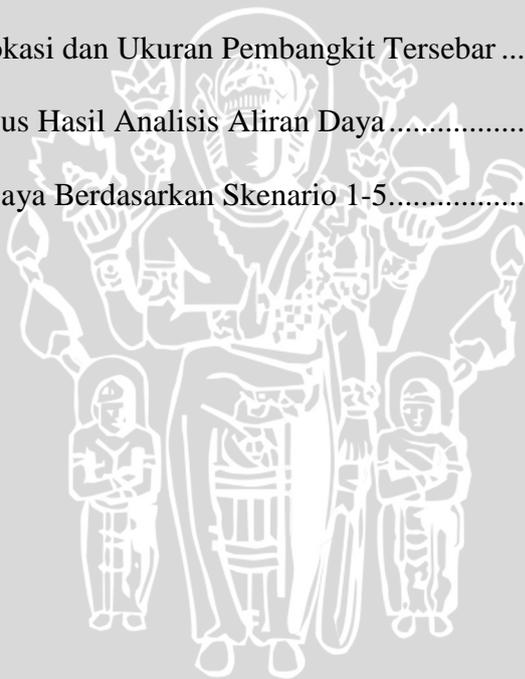
KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	ii
DAFTAR TABEL	iv
DAFTAR GAMBAR	v
DAFTAR LAMPIRAN	vi
RINGKASAN	vii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Tujuan Penelitian	3
1.5 Manfaat Penelitian	3
1.6 Sistematika Penulisan	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Tinjauan Pustaka.....	5
2.2 Pembangkit Tersebar	7
2.2.1 Defenisi Pembangkit Tersebar	7
2.2.2 Sejarah Perkembangan Pembangkit Tersebar.....	9
2.2.3 Teknologi Pembangkit Tersebar di Indonesia.....	10
2.2.3.1 Sejarah Perkembangan Pembangkit Tersebar.....	10
2.2.3.2 Teknologi Pembangkit Tersebar yang dapat dikembangkan di Indonesia.....	11
2.2.4 Interkoneksi Pembangkit Tersebar.....	15
2.2.5 Injeksi Daya Pembangkit Tersebar	17
2.3 Aliran Daya.....	17
2.3.1 Analisis Aliran Daya.....	17
2.3.2 Matriks Admitansi Bus	19
2.3.3 Persamaan Aliran Daya.....	20
2.3.4 Metode Aliran Daya.....	22
2.3.5 Rugi-rugi Daya Pada Sistem Distribusi	25
2.3.6 Sistem Per Unit	27



BAB III METODE PENELITIAN	28
3.1 Studi Literatur	28
3.2 Pengumpulan Data	28
3.3 Pemodelan Sistem	29
3.4 Tahapan Simulasi	29
3.5 Diagram Alir Metodologi Penelitian.....	30
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	30
4.1 Sistem Distribusi 20 kV Penyulang Dampit	31
4.1.1 Data Transformator GI Turen	31
4.1.2 Data Saluran Penyulang Dampit	31
4.2 Hasil Aliran Daya Sebelum Injeksi Pembangkit Tersebar	33
4.2.1 Analisis Aliran Daya Beban 100%	34
4.2.2 Analisis Aliran Daya Beban Rata-rata (60%)	35
4.2.3 Analisis Aliran Daya Beban Minimum (40%).....	37
4.3 Karakteristik Beban Harian Penyulang Dampit.....	39
4.4 Injeksi Pembangkit Tersebar.....	40
4.4.1 Data Perencanaan Peralatan Pembangkit Tersebar.....	40
4.4.2 Skenario Injeksi Pembangkit Tersebar	41
4.4.3 Hasil Skenario Berdasarkan Analisis Aliran Daya	42
4.4.3.1 Kondisi Tegangan Bus Setelah Injeksi Daya.....	42
4.4.3.2 Hasil Rugi Daya (<i>Losses</i>) Sesuai Skenario.....	44
4.5 Pembahasan.....	44
BAB V PENUTUP	46
5.1 Kesimpulan	46
5.2 Saran	46
DAFTAR PUSTAKA	47
LAMPIRAN	50

DAFTAR TABEL

Tabel 4.1.	Data Transformator Gardu Induk Turen.....	31
Tabel 4.2.	Data saluran penyulang Dampit	32
Tabel 4.3.	Data Penghantar antar Bus Penyulang Dampit	32
Tabel 4.4	Hasil Analisis Aliran Daya Beban Maksimum 100%	34
Tabel 4.5	Hasil Analisis Aliran Daya Beban Rata-Rata 60%	35
Tabel 4.6	Hasil Analisis Aliran Daya Beban Minimum 40%	37
Tabel 4.7	Karakteristik Beban Harian Penyulang Dampit	39
Tabel 4.8	Data <i>Typical</i> Generator.....	40
Tabel 4.9	Skenario Lokasi dan Ukuran Pembangkit Tersebar	41
Tabel 4.10.	Tegangan Bus Hasil Analisis Aliran Daya.....	42
Tabel 4.11.	Rugi-rugi Daya Berdasarkan Skenario 1-5.....	44

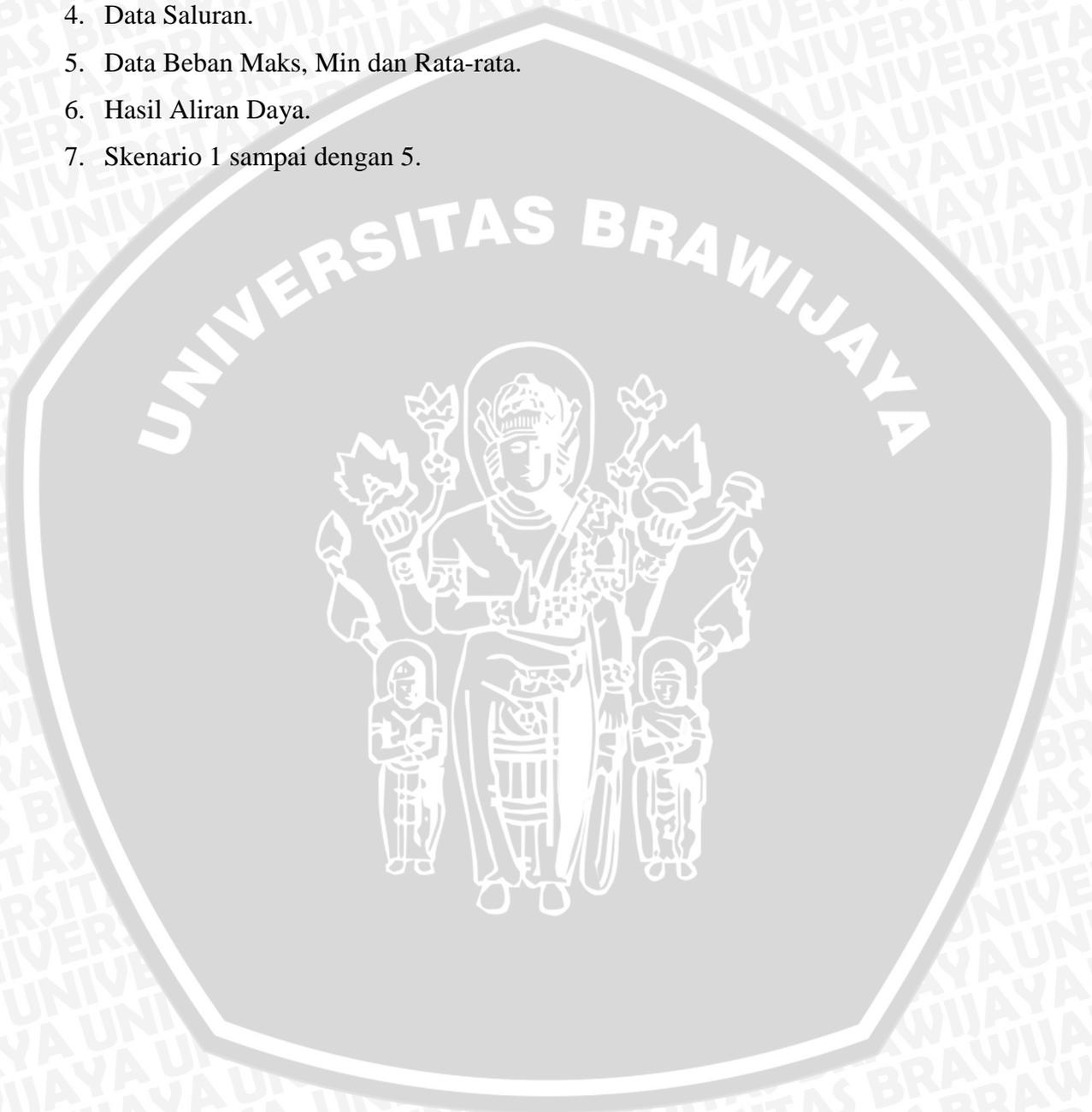


DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Skema Sederhana Pembangkit Tenaga Mikrohidro.....	12
Gambar 2.2	Skema Sederhana Pembangkit Listrik Tenaga Surya	14
Gambar 2.3	Interkoneksi Pembangkit Tersebar	16
Gambar 2.4	Tipikal Bus Dari Sistem Tenaga.....	20
Gambar 2.5	Model Saluran Transmisi Analisis Aliran Daya Dan Rugi Saluran.....	21
Gambar 2.6	Penjumlahan Trigonometri Daya Aktif, Reaktif dan Semu...	26
Gambar 2.7	Diagram Segaris Sistem dengan Dua (2) Bus.....	26
Gambar 2.8	Diagram Alir Metodologi Penelitian	30
Gambar 4.1.	Kurva Tegangan Pada Masing-Masing Bus	39
Gambar 4.2.	Grafik Karakteristik Beban Harian Penyulang Dampit	40
Gambar 4.3.	Kurva Tegangan Bus Setiap Skenario	43
Gambar 4.4.	Grafik Persentase Rugi-rugi Daya	44

DATA LAMPIRAN

1. *Single Line* Diagram Penyulang Dampit.
2. Rekap Beban Penyulang Dampit (UPJ. Dampit).
3. Data Trafo.
4. Data Saluran.
5. Data Beban Maks, Min dan Rata-rata.
6. Hasil Aliran Daya.
7. Skenario 1 sampai dengan 5.



RINGKASAN

Rizki Tirta Nugraha, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Agustus, 2014, *Analisis Rugi Daya Sistem Distribusi Dengan Peningkatan Injeksi Jumlah Pembangkit Tersebar*, Dosen Pembimbing : Hadi Suyono dan Rini Nur Hasanah.

Pengiriman daya listrik melalui saluran transmisi dan distribusi yang panjang dari pusat pembangkit (konvensional) ke pusat beban memiliki resiko teknis. Semakin panjang jaringan, maka tegangan akan turun dan rugi-rugi daya juga semakin besar. Salah satu upaya teknis untuk mengurangi penurunan tegangan dan mengurangi rugi-rugi daya sistem tenaga, yaitu membangun Pembangkit Tersebar (*Distributed Generations*). Daya yang dihasilkan oleh Pembangkit Tersebar sangat bergantung dari potensi energi yang dimiliki oleh suatu daerah. Berdasarkan uraian tersebut pada penelitian ini akan menganalisis pengaruh injeksi unit Pembangkit Tersebar terhadap sistem tenaga dengan peningkatan jumlah dan kapasitas daya pembangkit tersebar. Metode penelitian yang diusulkan untuk perhitungan aliran daya pada sistem 20 kV menggunakan analisis *Steady State* metode *Newton-Raphson*. Pemodelan sistem dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak *PSAT (Power System Analysis Toolbox) 2.1.8* yang berfungsi untuk memodelkan kondisi sistem sesuai dengan tujuan penelitian. Peningkatan injeksi pada interkoneksi Pembangkit Tersebar diharapkan dapat meningkatkan kualitas stabilitas sistem tenaga listrik pada saat unjuk kerja.

Hasil analisis aliran daya setelah injeksi Pembangkit Tersebar menunjukkan hasil terbaik berdasarkan lima (5) skenario yang telah ditetapkan. Level tegangan mengalami kenaikan yang cukup signifikan pada skenario-5 yaitu dimana Pembangkit Tersebar yang diinjeksikan berjumlah 6, secara berurutan masing-masing pada bus-bus 29, 45, 51, 39, 61, dan 69. Jumlah daya Pembangkit Tersebar yang diinjeksikan ke jaringan sesuai skenario 5 yaitu 0.9 MW untuk Generator 1, Generator 2, dan Generator 3, serta 3.06 MW untuk Generator 4, Generator 5, dan Generator 6. Kondisi tegangan pada skenario-5 hanya mengalami penurunan tegangan maksimal sebesar -1% dari tegangan nominalnya untuk semua bus. Naiknya level tegangan pada jaringan diiringi oleh penurunan rugi-rugi daya sampai dengan 1.87% untuk daya aktif (P) dan 2.64% untuk daya reaktif (Q) atau sebesar $P = 0.072$ MW dan $Q = 0.105$ Mvar. Dampak pada rugi-rugi daya, skenario injeksi Pembangkit Tersebar yang diterapkan menunjukkan hasil terbaik pada skenario-2, yaitu besarnya rugi-rugi daya menurun dari $0.040+j0.078$ MVA atau dari 4.37% menjadi 1.05% untuk daya aktif (P) dan 10.98% menjadi 1.98% untuk daya reaktif (Q).

Kata Kunci : Pembangkit tersebar, analisis rugi daya, injeksi daya, *photovoltaic*, PLTMH.

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Energi listrik merupakan suatu bentuk energi yang memiliki peran vital dalam aktivitas keseharian manusia. Faktor demografi yang tidak terkendali membawa banyak pengaruh dalam kehidupan, khususnya dalam bidang Energi. Laju pertumbuhan penduduk yang terus meningkat berbanding lurus dengan peningkatan kebutuhan kapasitas energi setiap tahun. Hal ini memunculkan masalah baru bagi pihak penyedia tenaga listrik yang dituntut untuk terus meningkatkan kontinuitas layanan *supply* daya listrik yang baik. Keadaan ini tidak didukung oleh ketersediaan cadangan energi di Indonesia mengingat sebagian besar pembangkit listrik yang ada di Indonesia masih didominasi jenis konvensional berbahan bakar fosil. Dampak buruk yang dihasilkan oleh keadaan krisis energi ini yaitu meningkatnya harga tarif dasar listrik (TDL). Kenaikan harga TDL berdampak terhadap seluruh proses produksi dan aktifitas masyarakat. Keadaan ini sangat membutuhkan solusi terkait diversifikasi energi, salah satunya ialah mengembangkan energi alternatif/terbarukan (*Renewable Energy*) yang ramah lingkungan, berkelanjutan (*sustainable*), ekonomis, dan secara teknis mudah untuk diimplementasikan. Hal ini sesuai dengan kebijakan pemerintah dalam Peraturan Presiden Republik Indonesia Nomor 5 tahun 2006 tentang kebijakan energi nasional, dimana persentase penggunaan *renewable energy* perlu ditingkatkan.

Pengiriman daya listrik melalui saluran transmisi dan distribusi yang panjang dari pusat pembangkit (konvensional) ke pusat beban memiliki resiko teknis. Semakin panjang jaringan, maka tegangan akan turun dan rugi-rugi daya juga semakin besar. Menurut Peraturan Menteri Energi Dan Sumber Daya Mineral Nomor 03 tahun 2007 perihal aturan jaringan sistem tenaga listrik Jawa-Madura-Bali menjelaskan bahwa tegangan sistem harus dipertahankan dalam batasan normal yaitu +5% dan -10% dari tegangan nominalnya (20 kV). Upaya teknis untuk mengurangi penurunan tegangan dan memperbaiki stabilitas dinamis sistem tenaga yaitu dengan membangun Pembangkit Tersebar (*Distributed Generation*). Pembangkit listrik tersebar didefinisikan sebagai pengoperasian unit pembangkit tenaga listrik bersifat *renewable energy* pada beberapa titik yang terhubung langsung ke jaringan distribusi atau terhubung ke jaringan di lokasi pelanggan (Ackermann, Andersson, dan Soder, 2001).

Pada umumnya instalasi unit Pembangkit Tersebar dilakukan pada sistem distribusi pola radial, dekat dengan pusat beban yang letaknya jauh dari pusat pembangkitan. Jaringan yang letaknya paling jauh dari pusat pembangkitan menghasilkan kualitas tegangan paling rendah. Supardi dan Prabowo, 2012 dalam penelitiannya mengatakan bahwa dampak dari injeksi unit Pembangkit Tersebar dapat mengurangi rugi daya dengan menyediakan lebih banyak suplai daya lokal. Sistem interkoneksi Pembangkit Tersebar dengan sistem distribusi memiliki efek terhadap kestabilan dinamis sistem tenaga (Muljono dan Nrrartha, 2009). Penentuan lokasi injeksi daya aktif dan reaktif sangat penting, karena ketidakseimbangan daya aktif dan reaktif pada saat injeksi ke jaringan akan menyebabkan ketidakstabilan tegangan pada jaringan (Haesen, *dkk.* 2005). Mithulananthan *dkk.* (2004) mengatakan bahwa peletakan unit Pembangkit Tersebar dapat mengurangi rugi-rugi daya pada jaringan bila peletakan dan ukuran dari unit Pembangkit Tersebar tersebut sesuai dengan kondisi sistem tersebut. Daya yang dihasilkan oleh Pembangkit Tersebar sangat bergantung dari potensi energi yang dimiliki suatu daerah. Permasalahan yang muncul kemudian adalah tingkat penyebaran dan ukuran kapasitas daya injeksi ke jaringan dapat mempengaruhi kualitas tegangan dan rugi-rugi daya pada sistem tenaga listrik. Oleh karena itu, dibutuhkan strategi penyebaran Pembangkit Tersebar dan variasi kapasitas daya yang sesuai dengan keadaan sistem tenaga.

Beberapa inovasi *renewable energy* yang sudah ada di Indonesia namun masih dimanfaatkan secara lokal diantaranya ialah Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) dan *Photovoltaic*. Kabupaten Malang, Provinsi Jawa Timur merupakan salah satu daerah di Indonesia yang terdapat banyak pembangkit listrik konvensional. Pembangkit tersebut terhubung ke beberapa gardu induk (GI) kemudian melalui saluran transmisi 150 kV, 70 kV hingga ke saluran distribusi 20 kV. Salah satu GI yang ada dalam wilayah Area Pelayanan Jaringan (APJ) Malang adalah GI Turen, yang berfungsi sebagai penyalur untuk menyuplai beban pada 11 penyulang melalui GI Kebonagung dengan bus 70 kV. Sebagai upaya untuk menjaga ketersediaan daya listrik dan menjaga stabilitas dinamis pada sistem tenaga yaitu dengan mengaplikasikan unit Pembangkit Tersebar. Hal ini tentunya harus sesuai dengan potensi energi terbarukan yang dimiliki daerah tersebut dalam satu jaringan sistem tenaga listrik. Berdasarkan uraian tersebut pada penelitian ini akan menganalisis pengaruh injeksi unit Pembangkit Tersebar terhadap sistem tenaga dengan peningkatan jumlah dan kapasitas daya pembangkit tersebar. Metode penelitian yang diusulkan untuk perhitungan aliran daya pada sistem

20 kV menggunakan analisis *Steady State* metode *Newton-Raphson*. Peningkatan injeksi pada interkoneksi Pembangkit Tersebar diharapkan dapat meningkatkan kualitas stabilitas sistem tenaga listrik pada saat unjuk kerja.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian diatas, maka dirumuskan masalah pada penelitian ini yaitu bagaimana dampak peningkatan jumlah injeksi Pembangkit Tersebar pada Penyulang Dampit Kabupaten Malang terhadap profil tegangan dan rugi-rugi daya.

1.3 Batasan Masalah

Beberapa hal yang menjadi batasan-batasan masalah untuk mempertegas ruang lingkup pembahasan :

1. Analisis *steady state* menggunakan metode *Newton-Raphson*.
2. Injeksi daya model Pembangkit Tersebar dilakukan pada salah satu penyulang dengan melihat penurunan tegangan dan beban yang sangat tinggi (hasil analisis *steady state*).
3. Tidak membahas gangguan dan sistem proteksi pada sistem tersebut.
4. Standar operasi injeksi Pembangkit Tersebar yang digunakan sesuai dengan Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Nomor 3 tahun 2007 Jawa-Madura-Bali.
5. Pemodelan injeksi daya Pembangkit Tersebar menggunakan *Power System Analisis Toolbox (PSAT) 2.1.8*.
6. Penelitian ini bersifat pemodelan sistem sehingga tidak membahas teknis dilapangan.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah :

1. Meminimalisir rugi-rugi daya aktif dan reaktif pada penyulang Dampit Kab. Malang.
2. Menaikkan profil tegangan pada penyulang tersebut.

1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penulisan skripsi ini adalah sebagai berikut:

1. Meminimalkan rugi-rugi daya dan drop tegangan pada sistem.
2. Menaikkan/Perbaiki nilai profil tegangan.
3. Mengantisipasi peningkatan beban oleh konsumen.

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika pembahasan dari skripsi ini terdiri dari:

- BAB I : Berisi tentang latar belakang, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan, manfaat, dan sistematika pembahasan.
- BAB II : Berisi tentang tinjauan pustaka atau dasar teori yang mendukung pembahasan dan analisis penulisan skripsi ini.
- BAB III : Berisi metodologi penelitian yang berisi metode yang digunakan dalam analisis, objek penelitian dan data yang diperlukan, serta langkah-langkah penelitian.
- BAB IV : Berisi pembahasan dan analisis penelitian dengan memperhatikan data yang tersedia.
- BAB V : Berisi kesimpulan dari tujuan penelitian serta saran dari penulis.



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Tinjauan Pustaka

Kemajuan Ilmu Pengetahuan dan Teknologi (IPTEK) telah membawa Renewable energi sebagai pilihan utama untuk mengatasi krisis energi yang semakin melanda umat manusia. Penelitian mengenai pentingnya analisis aliran daya untuk optimasi kapasitas pada Pembangkit Tersebar dalam sistem distribusi telah dilakukan oleh beberapa peneliti, diantaranya diantaranya Elias K. Bawan (2012) telah melakukan penelitian mengenai Dampak Pemasangan Pembangkit Tersebar pada rugi-rugi daya. Pada penelitiannya menjelaskan bahwa Pemasangan Pembangkit Tersebar pada bus sistem distribusi memberikan pengaruh penurunan rugi daya (*losses*) sistem distribusi tenaga listrik. Lokasi dan besarnya injeksi Pembangkit Tersebar memberikan pengaruh penurunan rugi daya sistem distribusi tenaga listrik. Injeksi pada lokasi bus 77 (65% panjang saluran dari grid) dengan besar injeksi 85% kapasitas Pembangkit Tersebar penurunan rugi daya sebesar dari 240,15 KW menjadi 99,39 KW atau penghematan sebesar 58,61% . Penelitiannya dilakukan dengan membuat model sistem distribusi sebelum dan sesudah pemasangan DG, kemudian menentukan besarnya nilai tingkat penetrasi (Injeksi) untuk pengujian dengan menggunakan program simulasi ETAP 6.0.

Elias K. Bawan, dkk (2011) menggunakan metode yang sama untuk meneliti tentang pengaruh interkoneksi Pembangkit Tersebar dalam sistem tenaga listrik dalam profil tegangan. Pemasangan Pembangkit Tersebar pada bus sistem distribusi memberikan pengaruh perbaikan profil tegangan sistem distribusi tenaga listrik. Lokasi injeksi Pembangkit Tersebar dan besarnya injeksi Pembangkit Tersebar juga memberikan pengaruh perbaikan profil tegangan sistem distribusi tenaga listrik. Saluran sistem distribusi tanpa interkoneksi unit Pembangkit Tersebar menghasilkan jatuh tegangan pada ujung jaringan sebesar 17,11 kV atau jatuh tegangan 14,48%. Injeksi pada jarak lokasi 80 km (65% panjang saluran dari grid) dengan besar injeksi 85% kapasitas DG memberikan peningkatan profil tegangan yang terbaik diantara semua skenario, yaitu 18,73 kV atau jatuh tegangan 6,34%.

Víctor H. Méndez Quezada, dkk. (2006) dalam *IEEE Transactionson Power Systems*, Vol. 21, No. 2 mengenai penilaian rugi-rugi distribusi energi untuk peningkatan penetrasi pembangkitan terdistribusi. Pada penelitiannya menjelaskan

bahwa rugi-rugi mulai turun ketika menghubungkan sedikit Pembangkit Tersebar sampai mencapai level minimum. Ketika level minimum ini dicapai, jika level penetrasi Pembangkit Tersebar masih naik, maka rugi-rugi mulai naik secara marginal. Jika level penetrasi Pembangkit Tersebar naik dengan cukup, maka rugi-rugi bahkan bisa lebih tinggi nilainya daripada tanpa Pembangkit Tersebar yang terhubung. Jenis bentuk ini muncul dalam semua kasus yang dipelajari. Berkenaan dengan dampak dari setiap jenis teknologi Pembangkit Tersebar, diamati bahwa turbin angin memiliki dampak positif terkecil pada rugi-rugi dibandingkan lainnya, misalkan, unit *Photovoltaic*. Hal ini terjadi karena energi yang diinjeksikan intermiten, menunjukkan variabilitas waktu yang tinggi, dan sangat tidak cocok dengan pola beban feeder. Sebaliknya, produksi *Photovoltaic* mengikuti variasi beban harian yang lebih baik. Semakin tersebar unit Pembangkit Tersebar, semakin besar dampaknya pada rugi-rugi. Namun, hasil menunjukkan bahwa dalam sebagian besar *feeder*, tiga unit Pembangkit Tersebar terhubung secara strategis cukup untuk menghasilkan benefit yang sama sebagai sebuah situasi ideal dengan beberapa unit Pembangkit Tersebar yang tersebar.

Knazkins (2004) menyimpulkan bahwa Pembangkit Tersebar memungkinkan memberi pengaruh terhadap sistem tenaga listrik pada pengoperasian, kendali dan stabilitas bila perbandingan penetrasinya besar. Dampak tersebut dapat berupa rugi-rugi pada jaringan, kualitas daya, hubung singkat yang berpengaruh terhadap proteksi dan stabilitas sistem. Pengaruh dari Pembangkit Tersebar pada sistem tenaga listrik selain sangat ditentukan oleh tingkat penetrasinya juga sangat ditentukan oleh teknologi dan model pengoperasian dari Pembangkit Tersebar tersebut. Jika ukuran dan penempatan dari Pembangkit Tersebar tersebut sesuai, maka akan memberikan pengaruh yang baik terhadap kontrol, operasi dan stabilitas sistem tenaga listrik tersebut.

Hasannuddin (2010) menjelaskan dampak pemasangan Pembangkit Tersebar pada sistem interkoneksi Jamali dengan tingkat penetrasi sebesar 20% dari jenis generator sinkron bila terjadi pelepasan beban dalam rentang waktu satu detik dari detik kedua sampai dengan detik ketiga sebesar 20% pada setiap bus menunjukkan perbaikan tanggapan tegangan dari seluruh pembangkit berupa penurunan tegangan maksimum antara 0,00 - 0,020 pu.

Saribu, Parlindungan Dolok (2008) menganalisis pengaruh pemasangan Pembangkit Tersebar pada suatu sistem distribusi terhadap keandalan sistem pada setiap titik beban dan keandalan sistem keseluruhan. Penelitian ini dilakukan dalam 7 studi kasus. Studi kasus pertama adalah sistem tanpa Pembangkit Tersebar. Kemudian studi

kasus kedua sampai ketujuh adalah dengan memasang Pembangkit Tersebar pada bus beban secara bergantian. Pada setiap studi kasus akan diperoleh indeks keandalan sistem, indeks keandalan setiap beban, ketersediaan daya dan biaya kerugian beban akibat pemutusan dengan menggunakan program EDSA *Technical* 2005. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pemasangan Pembangkit Tersebar pada setiap bus beban selalu memberikan perbaikan keandalan sistem pada setiap beban dan tentu saja keandalan sistem keseluruhan. Keandalan yang paling baik diperoleh ketika Pembangkit Tersebar dipasang bus 4.

Vu Van Thong, dkk (2005) melakukan penelitian bahwa pemasangan Pembangkit Tersebar dalam sistem distribusi dapat mempengaruhi profil tegangan. Penggunaan teknologi Pembangkit Tersebar yang berbeda, kapasitas injeksi serta karakteristik beban dapat mempengaruhi perubahan tegangan.

Reza, M (2007) mengatakan bahwa meskipun pembangkit tenaga listrik konvensional memiliki tingkat efisiensi dalam pembangkitan tenaga listrik namun memiliki hambatan alami dan buatan (*artificial constrains*) dalam proses pembangkitan serta pengiriman daya ke konsumen. Potensi Pembangkit Tersebar di Indonesia tersebar di seluruh wilayah khususnya oleh industri-industri yang memiliki *captive power* dan besarnya potensi energi dari sumber energi terbarukan seperti angin, air, dan surya.

2.2 Pembangkit Tersebar

Pembangkit Tersebar memiliki dampak yang signifikan terhadap rugi-rugi daya yang ditempatkan dekat dengan pusat beban. Unit Pembangkit Tersebar seharusnya ditempatkan pada lokasi yang memiliki tingkat rugi daya yang tinggi. Metode ini sama dengan proses penempatan kapasitor untuk mengurangi rugi-rugi daya. Perbedaan keduanya adalah dengan unit Pembangkit Tersebar akan mempengaruhi baik daya aktif dan daya reaktif sedangkan untuk pemasangan kapasitor bank hanya akan mempengaruhi daya aktif.

Beberapa penelitian tentang dampak pemasangan Pembangkit Tersebar pada sistem pelayanan listrik menunjukkan bahwa Pembangkit Tersebar memberikan dampak positif pada sistem antara lain meningkatkan keandalan suplai sistem, mengurangi rugi-rugi daya, meningkatkan kualitas daya dan sebagainya.

2.2.1 Definisi Pembangkit Tersebar

Pembangkit Tersebar seringkali disebut juga dengan *on-site generation*, *dispersed generation*, *embedded generation*, *decentralized generation*, atau *distributed eneryi*. Secara mendasar, Pembangkit Tersebar menghasilkan energi listrik dari

beberapa sumber energi yang berkapasitas kecil dan dihubungkan langsung pada jaringan distribusi. Secara teknis, Pembangkit Tersebar memiliki beberapa aspek definisi yang meliputi kapasitas, tujuan pemasangan, lokasi penempatan, dan teknologi yang digunakan. Beberapa definisi kapasitas Pembangkit Tersebar yang dimiliki oleh lembaga riset internasional adalah sebagai berikut:

1. *The Electric Power Research Institute* mendefinisikan batas kapasitas Pembangkit Tersebar sampai dengan 50 MW.
2. *Gas Research Institute* mendefinisikan Pembangkit Tersebar sebagai pembangkit dengan kapasitas antara 25 kW – 25 MW.
3. Preston dan Rastler menentukan ukuran mulai dari beberapa kilowatt hingga lebih dari 100 MW.
4. Cardell mendefinisikan Pembangkit Tersebar sebagai pembangkit dengan kapasitas antara 500 kW dan 1 MW.
5. *International Conference on Large High Voltage Electric Systems (CIGRE)* mendefinisikan Pembangkit Tersebar sebagai pembangkit dengan kapasitas lebih kecil dari 50 - 100 MW.

Berdasarkan tujuan instalasinya, Pembangkit Tersebar dibangun untuk menyediakan sumber daya aktif pada sistem tenaga listrik. Sehingga berdasarkan definisi secara internasional ini, Pembangkit Tersebar tidak diharuskan untuk mampu menyediakan daya reaktif (Radika H.W (2012)). Definisi lokasi penempatan Pembangkit Tersebar masih mengundang kontroversi diantara banyak peneliti. Kebanyakan peneliti mendefinisikan lokasi Pembangkit Tersebar pada sistem distribusi, namun dalam beberapa literatur penempatan Pembangkit Tersebar juga dapat dilakukan pada sisi sistem transmisi.

Menurut teknologi yang digunakan dalam pembangkitan, Pembangkit Tersebar dapat dibedakan menjadi *Traditional Generator* atau yang biasanya menggunakan *Internal Combustion Engine (ICE)*, serta *Modern Generator* yang terdiri dari *fuel cell*, *storage device*, dan *renewable energy* (Radika H.W (2012)). Penelitian ini menggunakan Pembangkit Tersebar jenis *renewable energy* dengan kapasitas antara 1 MW hingga 10 MW. *Renewable energy* dipilih karena merupakan teknologi ramah lingkungan yang paling ekonomis dan efisien dari segi biaya dan waktu.

Semua definisi di atas menunjukkan bahwa pembangkitan dengan skala kecil yang dihubungkan ke jaringan distribusi dapat dianggap sebagai bagian dari Pembangkit Tersebar. Selain itu, pembangkitan yang dipasangkan dekat dengan sisi beban atau konsumen juga dapat dikatakan sebagai Pembangkit Tersebar.

2.2.2 Sejarah Perkembangan Pembangkit Tersebar

Beberapa publikasi yang ada sekarang tentang Pembangkit Tersebar menunjukkan bahwa Pembangkit Tersebar merupakan suatu fenomena baru dan berkembang secara signifikan hampir di seluruh dunia. Namun, analisis dari Lembaga *Energy Information Administration* di Amerika Serikat menunjukkan bahwa implementasi Pembangkit Tersebar telah berkembang secara drastis pada akhir tahun 1980-an dan pertengahan tahun 1990-an.

Sebenarnya, perkembangan Pembangkit Tersebar dalam tahap awal telah dimulai ketika Pembangkit Tersebar digunakan sebagai *co-generator*. Penggunaan *co-generator* dimulai pada masa tahun 1960-an dan banyak dikembangkan pada lokasi-lokasi industri dengan memanfaatkan panas dari gas buang kondensor (*output thermal* dari alat pemanas berdaya besar).

Pasar untuk Pembangkit Tersebar terus berkembang. Unit-unit Pembangkit Tersebar terus diuji pada konsumen-konsumen perumahan, industri dan sebagainya sebagai salah satu sumber energi listrik yang mereka butuhkan. Di sisi lain, keuntungan dari Pembangkit Tersebar menunjukkan potensi yang besar. Dengan perubahan struktur energi listrik yang terus berkembang, saat ini Pembangkit Tersebar telah dimanfaatkan sebagai pembangkitan siaga yang memberi keuntungan pada sistem tenaga listrik sebagai sumber energi pada beban puncak, kehilangan daya pada sistem dan meningkatkan kualitas daya para konsumen. Beberapa perkembangan terus dilakukan dan membuat Pembangkit Tersebar tidak hanya mungkin dilakukan tetapi suatu potensi yang diharapkan.

Perkembangan Pembangkit Tersebar di masa sekarang didukung oleh dua (2) isu utama dalam sistem tenaga listrik pada masa sekarang (Siregar D. (2011)), yaitu :

1. Perubahan kebijakan energi listrik di seluruh dunia dari sistem monopoli menjadi sistem yang lebih kompetitif terkhusus pada sektor pembangkit yang memungkinkan keragaman dalam kepemilikan aset pembangkit sehingga akan adanya persaingan yang mendorong harga energi listrik menjadi lebih murah.
2. Kebijakan lingkungan yang berkelanjutan yang mengharapkan Pembangkit Tersebar dapat membantu mengurangi gas emisi terutama emisi karbon. Pemanfaatan energi Pembangkit Tersebar harus mendorong pengurangan emisi karbon karena umumnya teknologi Pembangkit Tersebar memiliki emisi karbon yang rendah bahkan ada yang emisi karbonnya nol seperti *Photovoltaic* (sel surya).

2.2.3 Teknologi Pembangkit Tersebar di Indonesia

2.2.3.1 Sejarah Perkembangan

Perkembangan teknologi Pembangkit Tersebar di Indonesia telah berkembang sejak lama seiring dikeluarkannya Peraturan Pemerintah Nomor 10 Tahun 1989 “Tentang Penyediaan dan Pemanfaatan Energi” yang mengizinkan pembelian terhadap kelebihan energi listrik (*excess power*). Teknologi Pembangkit Tersebar yang banyak digunakan pada masa itu adalah teknologi *cogeneration*. Bahkan menurut data penelitian *Energy and Electricity* (EERDC), kapasitas terpasang teknologi *cogeneration* telah mencapai 834 MW pada tahun 1997.

Perkembangan teknologi Pembangkit Tersebar terus berkembang dengan memanfaatkan pembangkit listrik skala kecil yang dikelola oleh pihak PLN atau swasta (*Independent Power Producer*). Sejak tahun 2002, teknologi Pembangkit Tersebar di Indonesia dikenal sebagai “Pembangkit Listrik Skala Kecil Tersebar” seperti yang tertuang dalam Peraturan Pemerintah Nomor 30 tahun 2002.

Melalui PP Nomor 31/2009, Pemerintah juga mendorong penggunaan sumber energi baru, terbarukan dan energi primer yang lebih efisien untuk pembangkit tenaga listrik, dan diberikan kesempatan bagi Pembangkit Skala Kecil Swasta dan Koperasi (PSKSK) untuk menjual tenaga listriknya kepada PLN. Harga jual tenaga listrik dari PSKSK adalah harga pada titik interkoneksi dengan Sistem PLN dan harga jual ini disesuaikan setiap tahunnya berdasarkan perhitungan biaya marginal Sistem PLN.

Dewasa ini, skema pemanfaatan teknologi Pembangkit Tersebar di Indonesia dibagi atas 2 (Siregar D. (2011)), yaitu:

1. Skema IPP (Independent Power Producer)

Skema ini berisi perjanjian dimana teknologi Pembangkit Tersebar harus mengirim tenaga listriknya ke sistem PLN secara *continue* (24 jam). Skema ini biasanya memiliki kontrak dalam jangka waktu yang lama (minimal 15 tahun) dan dapat diperpanjang sesuai kebutuhan atas kesepakatan bersama.

2. Skema Pembelian *Excess Power* (Kelebihan Tenaga Listrik)

Skema ini berisi perjanjian dimana teknologi Pembangkit Tersebar mengirim kelebihan tenaga listriknya ke sistem PLN pada waktu-waktu tertentu (biasanya pada Waktu Beban Puncak). Skema ini biasanya memiliki kontrak jangka pendek (1 tahun) dan dapat diperpanjang sesuai kebutuhan atas kesepakatan bersama.

2.2.3.2 Teknologi Pembangkit Tersebar yang Dapat Dikembangkan di Indonesia

Beberapa jenis teknologi Pembangkit Tersebar yang dapat dikembangkan di Indonesia adalah mikrohidro, bahan bakar nabati, biomassa, energi angin, tenaga surya, energi *hybrid* (angin dan surya), pasang surut air laut, dan panas bumi. Disini, penulis hanya akan memaparkan intisari dari dua (2) jenis teknologi Pembangkit Tersebar saja, yaitu Mikrohidro dan *Photovoltaic*.

1. Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH).

Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) adalah pembangkit listrik berskala kecil (kurang dari 100 kW), yang memanfaatkan tenaga (aliran) air sebagai sumber penghasil energi. PLTMH termasuk sumber energi terbarukan dan layak disebut *clean energy* karena ramah lingkungan. Dari segi teknologi, PLTMH dipilih karena konstruksinya sederhana, mudah dioperasikan, serta mudah dalam perawatan dan penyediaan suku cadang. Secara ekonomi, biaya operasi dan perawatannya relatif murah, sedangkan biaya investasinya cukup bersaing dengan pembangkit listrik lainnya. Secara sosial, PLTMH mudah diterima masyarakat luas (bandingkan misalnya dengan Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir). PLTMH biasanya dibuat dalam skala desa di daerah-daerah terpencil yang belum mendapatkan listrik dari PLN. Tenaga air yang digunakan dapat berupa aliran air pada sistem irigasi, sungai yang dibendung atau air terjun. PLTMH pada prinsipnya memanfaatkan beda ketinggian dan jumlah debit air per detik yang ada pada aliran air saluran irigasi, sungai atau air terjun. Aliran air ini akan memutar poros turbin sehingga menghasilkan energi mekanik. Energi ini selanjutnya menggerakkan generator dan menghasilkan listrik (Harun N. (2011)).

Beberapa komponen Mikrohidro :

- Air, sebagai sumber energi.
- Turbin, mengkonversi energi aliran air menjadi energi putaran mekanis.
- Generator, menghasilkan listrik dari putaran mekanis.
- Saluran pembawa (*head race*), saluran pembawa mengikuti kontur dari sisi bukit untuk menjaga elevasi dari air yang disalurkan.
- Panel kontrol, untuk menstabilkan tegangan.
- Kincir air, sebagai penggerak dinamo.
- Dsb.

Sketsa sederhana dari sebuah pembangkit tenaga mikrohidro ditunjukkan oleh

Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Skema Sederhana Pembangkit Tenaga Mikrohidro
(Sumber: Sulis Tiyono, 2013)

Karena besar tenaga air yang tersedia dari suatu sumber air bergantung pada tinggi jatuh dan debit air, maka total energi yang tersedia dari suatu reservoir air merupakan energi potensial air. Dengan demikian potensi daya air yang tersedia berdasarkan energi potensial dapat ditulis dalam bentuk persamaan berikut (Siregar D. (2011)):

$$PG = \rho \cdot g \cdot Q \cdot Hg \quad (2.1)$$

dimana :

PG = potensi daya (kW)

ρ = massa jenis (kg/m³)

Q = debit aliran air (m³/s)

Hg = head kotor (m)

g = percepatan gravitasi (9,81 m/det²)

Potensi daya listrik yang dapat dibangkitkan adalah :

$$P = \rho \cdot g \cdot Q \cdot He \cdot Eff \quad (2.2)$$

dimana :

P = daya listrik yang keluar dari generator (kW)

He = head efektif (m)

Eff = efisiensi

2. Pembangkit Listrik Tenaga Surya (*Surya cell*)/*Photovoltaic*.

Sebagai negara yang berada di ekuator, Indonesia mempunyai potensi energi matahari yang sangat besar. Ada dua cara yang umum digunakan dalam pemanfaatan energi matahari, yaitu menggunakan solar-thermal dan sel *Photovoltaic*. Pada sistem

solar-thermal, panas matahari dikumpulkan dengan menggunakan cermin untuk memanaskan air yang diletakkan dalam suatu ketel (*boiler*). Uap yang dihasilkan selanjutnya digunakan untuk memutar turbin dan generator. Pada sistem *Photovoltaic*, energi matahari langsung diubah menjadi energi listrik dengan menggunakan sel *Photovoltaic* atau sel surya (Dahono, P.A (2008). Di sini kita hanya akan membahas sedikit tentang pembangkit listrik tenaga surya berbasis *Photovoltaic*.

Energi matahari merupakan sumber energi penting sejak dahulu kala, dimulai cara memanfaatkan yang primitif sampai teknologi *Photovoltaic*. Matahari melepas 95% energinya sebagai cahaya yang bisa dilihat dan sebaian lagi sebagai yang tidak terlihat seperti sinar *infra-red* dan *ultra-violet*. Berdasarkan data penyinaran matahari yang dihimpun dari 18 lokasi di Indonesia, radiasi surya di Indonesia dapat diklasifikasikan berturut-turut sebagai berikut: untuk kawasan barat dan timur Indonesia dengan distribusi penyinaran di Kawasan Barat Indonesia (KBI) sekitar 4,5 kWh/m²/hari dengan variasi bulanan sekitar 10%; dan di Kawasan Timur Indonesia (KTI) sekitar 5,1 kWh/m²/hari dengan variasi bulanan sekitar 9%. Dengan demikian, potensi energi surya rata-rata Indonesia sekitar 4,8 kWh/m²/hari dengan variasi bulanan sekitar 9% (Siregar, D. (2011)).

Energi surya berupa radiasi elektromagnetik yang dipancarkan ke bumi berupa cahaya matahari yang terdiri atas foton atau partikel energi surya yang dikonversikan menjadi energi listrik. Energi surya yang sampai pada permukaan bumi disebut sebagai radiasi surya global yang diukur dengan kepadatan daya pada permukaan daerah penerima. Rata-rata nilai dari radiasi surya atmosfer bumi adalah 1.353 W/m yang dinyatakan sebagai konstanta surya. Intensitas radiasi surya dipengaruhi oleh waktu siklus perputaran bumi, kondisi cuaca meliputi kualitas dan kuantitas awan, pergantian musim dan posisi garis lintang. Intensitas radiasi sinar matahari di Indonesia berlangsung 4 - 5 jam per hari. Produksi energi surya pada suatu daerah dapat dihitung sebagai berikut (Hasan, H (2012)) :

$$E = I \times A \quad (2.3)$$

dimana,

E = Energi surya yang dihasilkan (W).

I = Isolasi/Intensitas radiasi surya rata-rata yang diterima selama satu jam (W/m).

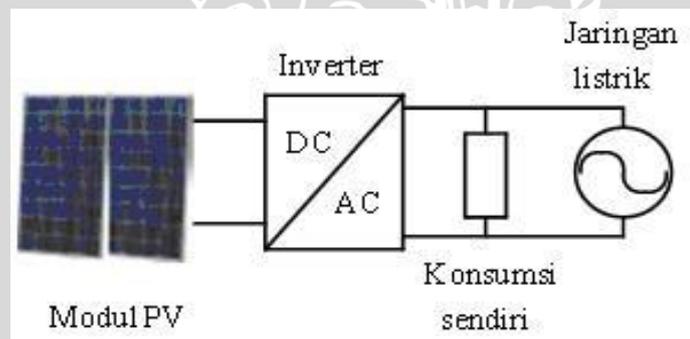
A = Luas area (m²).

Energi surya yang dikonversikan menjadi energi listrik disebut juga dengan energi *photovoltaic*. Pada awalnya teknologi ini digunakan sebagai pembangkit listrik di

daerah pedesaan terpencil kemudian berkembang menjadi lampu penerangan jalan berenergi surya, penyediaan listrik di tempat umum seperti rumah peribadatan, pelayanan kesehatan, instansi-instansi pemerintah. Walaupun awalnya hanya cukup untuk kebutuhan penerangan namun PLTS cukup membantu elektrifikasi di tempat yang membutuhkan. Selain itu telah tersedia pula pompa air tenaga surya, yang digunakan untuk pengairan irigasi atau sumber air bersih (air minum) (Hasan, H (2012).

Cahaya matahari dapat diubah menjadi energi listrik melalui modul surya yang terbuat dari bahan semikonduktor. Bahan semikonduktor, merupakan bahan semi logam yang memiliki partikel yang disebut elektron-proton, yang apabila digerakkan oleh energi dari luar akan membuat pelepasan elektron sehingga menimbulkan arus listrik dan pasangan elektron *hole*. Modul surya mampu menyerap cahaya sinar matahari yang mengandung gelombang elektromagnetik atau energi foton ini. Energi foton pada cahaya matahari ini menghasilkan energi kinetik yang mampu melepaskan elektron-elektron ke pita konduksi sehingga menimbulkan arus listrik. Energi kinetik akan makin besar seiring dengan meningkatnya intensitas cahaya dari matahari. Intensitas cahaya matahari tertinggi diserap bumi di siang hari sehingga menghasilkan tenaga surya yang diserap bumi ada sekitar 120.000 terra Watt. Jenis logam yang digunakan juga akan menentukan kinerja daripada sel surya (Hasan, H (2012).

Sketsa sederhana dari sebuah pembangkit tenaga surya ditunjukkan oleh Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Skema sederhana Pembangkit Listrik Tenaga Surya (Sumber: Alpen Steel, 2014 : 561)

Gambar 2.2 memperlihatkan skema pembangkit listrik tenaga surya skala kecil yang dipakai untuk skala rumah tangga. Tegangan DC yang dihasilkan sel surya diubah menjadi tegangan AC dengan menggunakan *inverter*. *Inverter* diparalel dengan tegangan jala-jala (misal PLN). Sebagian energi listrik yang dihasilkan sel surya akan dikonsumsi sendiri. Jika berlebih, energi listrik yang dihasilkan bisa dijual ke jaringan

PLN. Pembangkit listrik semacam ini tidak memerlukan baterai sebagai penyimpan energi (Dahono, P.A (2008)).

Kelebihan dari penggunaan energi surya antara lain :

1. Energi surya merupakan energi yang tersedia hampir diseluruh bagian permukaan bumi dan tidak habis (*renewable energy*).
2. Penggunaan energi surya tidak menghasilkan polutan dan emisi yang berbahaya baik bagi manusia maupun lingkungan.

Kekurangan dari penggunaan energi surya antara lain :

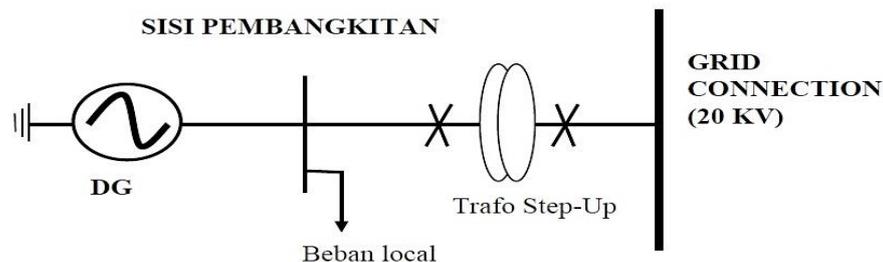
1. Sistem pemanas air dan pembangkit listrik tenaga surya tidak efektif digunakan pada daerah memiliki cuaca berawan untuk waktu yang lama.
2. Pada musim dingin, pipa-pipa pada sistem pemanas ini akan pecah karena air di dalamnya membeku.
3. Membutuhkan lahan yang sangat luas yang seharusnya digunakan untuk pertanian, perumahan, dan kegiatan ekonomi lainnya. Hal ini karena rapat energi matahari sangat rendah.
4. Sistem hanya bisa digunakan pada saat matahari bersinar dan tidak bisa digunakan ketika malam hari atau pada saat cuaca berawan.

2.2.4 Interkoneksi Pembangkit Tersebar

Kecenderungan sistem tenaga listrik saat ini adalah terbentuknya sistem interkoneksi antara satu pusat pembangkit dengan pembangkit lainnya dengan tujuan untuk meningkatkan keandalan sistem tenaga listrik. Pembangkit skala kecil yang digunakan untuk menyuplai daya ke sistem distribusi sedang dikembangkan sesuai dengan perkembangan jaringan listrik existing PLN. Pembangkit tersebut dikenal dengan istilah Pembangkit Tersebar. Penambahan kapasitas pemasangan pembangkit tersebar *renewable energy* pada sistem distribusi *existing* PLN 20 kV memiliki efek terhadap kestabilan sistem, keandalan sistem, kualitas daya, dan sistem proteksi. Secara garis besar, interkoneksi pada DG terbagi atas tiga komponen (Siregar, D. (2011)), yaitu:

a. Sumber Energi Utama (*Prime Energy Source*)

Hal ini menunjuk pada teknologi Pembangkit Tersebar sebagai sumber energi seperti energi surya, angin, mikrohidro, pasang surut dan biomassa. Setiap teknologi DG memiliki karakter yang berbeda-beda dalam menghasilkan energi, misalnya tipikal energi yang dihasilkan oleh PV dan *fuel cell* berupa *direct current* atau *wind turbin* yang tipikal energinya berupa energi mekanis (dihasilkan dari putaran pada turbin).



Gambar 2.3 Interkoneksi Pembangkit Tersebar
(Sumber: D. Siregar, 2012)

b. *Power Converter*

Power converter dalam interkoneksi, berfungsi untuk mengubah energi dari sumber energi utama (*prime energy resources*) menjadi energi dengan level frekuensi tertentu (50Hz-60Hz). Secara garis besar, ada tiga (3) kategori *power converter* yang dipergunakan dalam interkoneksi, yaitu:

1. Generator sinkron
2. Generator induksi
3. *Static power converter*

Generator sinkron dan generator induksi mengkonversi putaran energi mekanis ke dalam tenaga listrik dan sering disebut dengan *routing power converter*. *Static power converter* (biasa dikenal dengan inverter) tersusun atas *solid-device* seperti transistor. Pada inverter, transistor mengkonversi energi dari sumber menjadi energi dengan frekuensi 50-60Hz dengan *switching (switch on-off)*. Teknologi Pembangkit Tersebar yang dijual di pasaran, kebanyakan telah diintegrasikan dengan *power converter* masing-masing. Misalnya *fuel cell* yang telah diintegrasikan dengan inverter. *Power converter* memiliki efek yang besar terhadap Pembangkit Tersebar pada sistem distribusi. Oleh sebab itu dibutuhkan peralatan interkoneksi untuk menjamin keamanan dan kestabilan operasi. Generator sinkron, generator induksi dan inverter memberikan respon yang sangat berbeda terhadap variasi kondisi dari sistem tenaga.

c. Sistem *Interface* dan Peralatan Proteksi

Peralatan ini ditempatkan sebagai penghubung antara terminal output dari *power converter* dan jaringan primer. Komponen interkoneksi ini biasanya terdiri atas *step-up transformer*, *metering* kadang ditambahkan *controller* dan relay proteksi. Dalam komponen ini terkadang terdapat *communication link* untuk mengontrol kondisi pada sistem.

2.2.5 Injeksi Daya Pembangkit Tersebar

Ada tiga (3) tipe injeksi unit Pembangkit Tersebar berbeda sebagai model sumber terbarukan yang dianggap dapat :

- Tipe 1 : Menginjeksi daya nyata (P) saja.
- Tipe 2 : Menginjeksi daya nyata dan daya reaktif ($P + jQ$)
- Tipe 3 : Menginjeksi daya nyata, tetapi mengkonsumsi daya reaktif ($P - jQ$)

Photovoltaic atau *fuel cells* yang menghasilkan daya nyata saja merupakan contoh untuk tipe 1. Tipe 2 didasarkan pada generator sinkron. Tipe 3 adalah sebagian besar generator induksi yang digunakan pada *wind turbines* (Seker A.A & Hocaoglu M.H. (2013)).

2.3 Aliran Daya

Studi aliran daya merupakan hal penting dalam desain dan perencanaan pengembangan sistem daya guna menentukan operasi terbaik pada sistem. Keterangan utama yang diperoleh dari sebuah studi aliran daya adalah besar dan sudut fasa tegangan, daya reaktif, daya aktif yang dibangkitkan generator dan daya aktif dan reaktif yang mengalir pada setiap saluran/cabang. Studi aliran daya juga memberikan informasi mengenai *losses* dan beban saluran transmisi di setiap lokasi untuk evaluasi regulasi kinerja sistem tenaga. Studi ini juga digunakan untuk mengevaluasi sistem tenaga listrik terhadap pengaruh kondisi pembebanan yang berbeda. Studi-studi seperti hubung singkat, stabilitas, pembebanan ekonomis juga memerlukan studi aliran daya terlebih dahulu.

2.3.1 Analisis Aliran Daya

Studi aliran daya di dalam sistem tenaga merupakan studi yang mengungkapkan kinerja dan aliran daya (nyata dan reaktif) untuk keadaan tertentu ketika sistem bekerja saat tunak (*steady state*). Tujuan utama studi aliran daya adalah untuk menentukan magnitudo tegangan, sudut/vektor tegangan, aliran daya aktif dan daya reaktif pada saluran, serta rugi-rugi transmisi yang muncul dalam sistem tenaga. Hasil studi aliran daya dapat dijadikan pedoman dalam perencanaan, pengoperasian sistem, penjadwalan ekonomis sistem pembangkit, dan juga dibutuhkan dalam banyak analisis seperti stabilitas transien dan studi kontingensi (Ervan Hasan H., 2012). Selain dipergunakan untuk perencanaan pengembangan sistem listrik pada masa mendatang, juga dapat digunakan untuk mengevaluasi kondisi sistem kelistrikan yang sudah ada (*existing*) (Gupta, 1998). Karena operasi sistem tenaga listrik yang memuaskan adalah bergantung

kepada pengenalan serta pengetahuan dari akibat adanya penambahan beban, unit pembangkit, dan saluran transmisi baru, sebelum semuanya dapat direalisasikan.

Setiap titik/bus pada suatu sistem tenaga listrik terdapat daya aktif P , daya reaktif Q , tegangan E , dan sudut fasa tegangan δ . Jadi pada setiap bus terdapat empat besaran yaitu P , Q , E dan δ . Di dalam studi aliran daya, dua dari keempat besaran itu diketahui, dan dua yang lain perlu dicari. Berdasarkan hal tersebut di atas, bus-bus dibedakan menjadi tiga jenis yaitu bus beban, bus generator, dan bus berayun (*slack bus*). (Grainger dan Stevenson, 1994 : 332)

- Bus beban (*P-Q bus*)
Pada bus ini, selisih daya antara daya yang dibangkitkan oleh generator dan daya yang diserap oleh beban diketahui nilainya.
- Bus generator (*P-V bus*)
Komponen yang diketahui dalam bus ini adalah besar tegangan dan daya aktif P , sedangkan yang tidak diketahui adalah sudut fasa tegangan dan daya reaktif Q .
- Bus berayun (*Slack bus*)
Komponen yang diketahui dalam bus ini adalah besar tegangan dan sudut fasa, sedangkan yang tidak diketahui adalah daya aktif P dan daya reaktif Q . Umumnya dalam studi aliran daya hanya terdapat satu bus berayun.

Adapun data-data yang dibutuhkan dalam analisis aliran daya adalah sebagai berikut (Harun, E.H (2012)) :

- Diagram satu garis (*one line diagram*) sistem tenaga listrik.
- Generator yang tersambung dengan sistem, kapasitas daya terpasang dalam (MW) dan daya mampu dari masing-masing pembangkit dalam satuan MW.
- Transformator disetiap Gardu Induk.
- Jenis dan panjang penghantar yang digunakan.
- Bus, data yang dibutuhkan adalah: rating kV, %V, *angle*, dan LDF.
- Beban, yakni beban yang dilayani oleh sistem tenaga listrik.

Asumsi dasar dari masalah aliran beban adalah dengan menganggap rangkaian sebagai rangkaian linear dan seimbang yang diwakili oleh parameter jaringan tergumpal. Karena itu untuk masalah tak linear akan direpresentasikan dalam bentuk linear sebagaimana asumsi di atas, karena keadaan yang ditetapkan pada node adalah tak linear. Oleh karena itu penyelesaian aliran beban dibuat secara iterasi atau berangka (*numerical analysis*). Pada sistem multi-rel, penyelesaian aliran daya adalah dengan membentuk persamaan aliran daya pada sistem. Metode yang digunakan pada umumnya

dalam penyelesaian aliran daya, yaitu metode: *Newton-Raphson*, *Gauss-Seidel*, *Fast Decoupled*, dan metode injeksi arus (*Current Injections Method*) yang merupakan metode baru hasil pengembangan dari metode *Newton-Raphson*. Berkaitan dengan judul skripsi ini, maka metode yang akan dipaparkan adalah metode “*Newton-Raphson*”.

2.3.2 Matriks Admitansi Bus

Dalam sistem tenaga, impedansi biasanya menggunakan nilai dasar atau base dalam per unit pada dasar MVA sementara untuk penyederhanaan resistansi diabaikan. Sebelum memulai analisis, impedansi-impedansi dirubah terlebih dahulu menjadi admintansi seperti dibawah ini:

$$y_{ij} = \frac{i}{z_{ij}} = \frac{1}{r_{2j} + jx_{1j}} \quad (2.4)$$

Dimana,

y_{ij} = admintansi kawat bus- i ke bus- j

Untuk sistem bus- n , persamaan arus pada simpul dalam bentuk matriks ialah:

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_i \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \dots & Y_{1i} & \dots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \dots & Y_{2i} & \dots & Y_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{i1} & Y_{i2} & \dots & Y_{ii} & \dots & Y_{in} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \dots & Y_{ni} & \dots & Y_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_i \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} \quad (2-5)$$

Atau,

$$I_{bus} = Y_{bus} V_{bus} \quad (2-6)$$

Dengan,

I_{bus} : vektor arus bus yang diinjeksikan, arus positif jika menuju bus dan arus negatif jika meninggalkan bus.

V_{bus} : vektor tegangan bus yang diukur dari simpul referensi

Y_{bus} : matriks admintansi bus

Sedangkan nilai admintansi sendiri yaitu,

$$Y_{ii} = \sum_{j=0}^n Y_{ij} \quad , \quad i \neq j \quad (2-7)$$

dengan admintansi bersama, yaitu:

$$Y_{ij} = Y_{ji} = -y_{ij} \quad (2-8)$$

Jika arus bus diketahui, persamaan (2-6) dapat diselesaikan untuk tegangan n -bus yaitu:

$$V_{bus} = Y_{bus}^{-1} I_{bus} \quad (2-9)$$

Invers dari matriks admintansi bus dikenal sebagai matriks impedansi bus Z_{bus} .

2.3.3 Persamaan Aliran Daya

Jaringan sistem tenaga seperti pada gambar 2.4, salurannya dapat digambarkan dengan model- π yang mana impedansi-impedansinya telah diubah mejadi admintansi-admintansi per-unit pada *base*/dasar MVA.

Aplikasi hukum arus kirchoff pada bus ini diberikan dalam :

$$\begin{aligned} I_i &= y_{i0}V_i + y_{i1}(V_i - V_1) + y_{i2}(V_i - V_2) + \dots + y_{in}(V_i - V_n) \\ &= (y_{i0} + y_{i1} + y_{i2} + \dots + y_{in})V_i - y_{i1}V_1 - y_{i2}V_2 - \dots + y_{in}V_n \end{aligned} \quad (2-10)$$

Atau,

$$I_i = V_i \sum_{j=0}^n y_{ij} - \sum_{j=1}^n y_{ij} V_j, \quad \text{dimana } j \neq i \quad (2-11)$$

Daya reaktif dan aktif pada bus i adalah:

$$P_i + jQ_i = V_i I_i^* \quad (2-12)$$

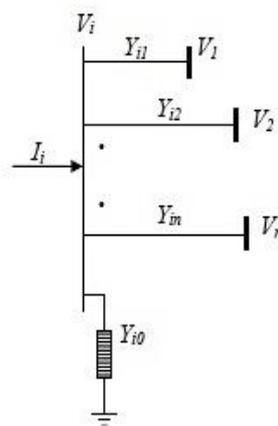
Atau,

$$I_i = \frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} \quad (2-13)$$

Subtitusi untuk I_i pada persamaan 2-11 maka:

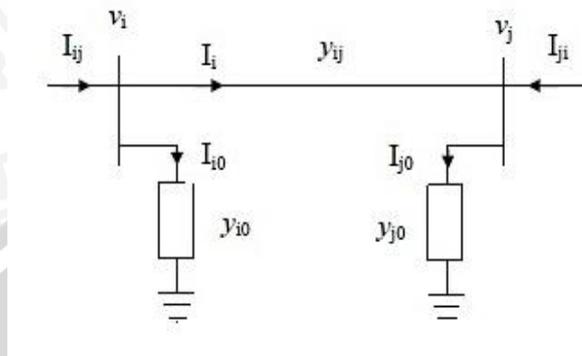
$$\frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} = V_i \sum_{j=0}^n y_{ij} - \sum_{j=1}^n y_{ij} V_j, \quad \text{dimana } j \neq i \quad (2-14)$$

Dari hubungan di atas formulasi perhitungan dari aliran daya dalam sistem tenaga harus diselesaikan dengan menggunakan teknik iterasi.



Gambar 2.4 Tipikal bus dari sistem tenaga
(Sumber: Cekmas Cekdin, 2007: 5)

Dalam perhitungan aliran daya selain menentukan besaran daya pada tiap bus, analisis aliran daya juga digunakan untuk menentukan besar kerugian daya yang hilang pada saluran transmisi selama proses penyaluran daya dari pembangkit ke pusat beban. Misalkan saluran dihubungkan dengan dua bus, yaitu bus i dan bus j seperti pada gambar 2.5.



Gambar 2.5 Model saluran transmisi untuk perhitungan aliran daya dan rugi saluran (Sumber: Cekmas Cekdin, 2007 : 7).

Perhatikan saluran yang terhubung antara bus i dan j pada gambar 2.5. Arus saluran I_{ij} diukur pada bus i dan dianggap positif untuk arah i ke j , sehingga dapat ditulis pada persamaan (2-15).

$$I_{ij} = I_i + I_{i0} = y_{ij} (V_i - V_j) + y_{i0} V_i \quad (2-15)$$

Dimana,

I_i : Arus pada saluran antara bus i dan bus j

I_{i0} : Arus pada saluran *half line charging*

y_{ij} : Admitansi saluran antara bus i dan bus j

y_{i0} : *Half line charging*

V_i : Tegangan bus i

V_j : Tegangan bus j

Demikian juga arus saluran I_{ji} diukur pada bus j dan dianggap positif untuk arah j ke i , dapat ditulis pada persamaan (2-16).

$$I_{ji} = -I_i + I_{i0} = y_{ij} (V_i - V_j) + y_{i0} V_i \quad (2-16)$$

Daya kompleks S_{ij} dari bus i ke j dan S_{ji} dari bus j ke i dinyatakan pada Persamaan (2-17) dan (2-18).

$$S_{ij} = V_i I_{ij}^* \quad (2-17)$$

$$S_{ji} = V_j I_{ji}^* \quad (2-18)$$

Rugi daya dalam saluran $i-j$ adalah penjumlahan aljabar dari daya yang ditentukan dari persamaan (2-17) dan (2-18), sehingga dapat dinyatakan pada persamaan (2-19).

$$S_{L,ij} = S_{i,j} + S_{j,i} \quad (2-19)$$

Sehingga persamaan untuk mendapatkan total rugi saluran untuk sistem dengan jumlah n bus adalah pada Persamaan (2-20).

$$S_{L,T} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n S_{L,ij} \quad (2-20)$$

Dimana,

$S_{L,ij}$: Rugi daya pada saluran antara bus i dan j

$S_{L,T}$: Total rugi daya

2.3.4 Metode Aliran Daya

Dalam menganalisa sistem jaringan yang memiliki lebih dari satu sumber listrik ataupun pada sistem jaringan kompleks maka diperlukan suatu metode analisa daya yang sesuai untuk memudahkan perhitungan. Oleh karena itu, untuk mempermudah perhitungan akan digunakan metode *Newton-Raphson* (Hadi Saadat, 1999: 232).

Dalam metode ini persamaan aliran daya dirumuskan dalam bentuk polar. Dari gambar 2.4, arus yang memasuki bus i dapat dicari dengan menggunakan persamaan:

$$I_i = \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j \quad (2-21)$$

Persamaan diatas dapat ditulis dalam bentuk polar yaitu:

$$I_i = \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j| \angle \theta_{ij} + \delta_j \quad (2-22)$$

Dimana, θ_{ij} = Sudut fasa tegangan

δ_j = Sudut daya (rotor) terhadap *infinite bus*

Daya kompleks pada bus- i yaitu:

$$P_i + jQ_i = V_i I_i^* \quad (2-23)$$

Persamaan (2.22) dapat disubstitusikan kedalam persamaan (2.23) sehingga menghasilkan:

$$P_i + jQ_i = |V_i| \angle -\delta_i \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j| \angle \theta_{ij} + \delta_j \quad (2-24)$$

Setelah itu, pisahkan bagian real dan imajiner persamaan diatas sehingga menjadi:

$$P_i = \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos (\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2-25)$$

$$Q_i = \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin (\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2-26)$$

Persamaan (2-25) dan (2-26) akan membentuk persamaan *non-linier*. Besar setiap variable dinyatakan dalam *p.u.* (per-unit) sedangkan sudut fasa dinyatakan dalam radian.

Persamaan (2-25) dan (2-26) dikembangkan dalam Deret Taylor seperti pada persamaan dibawah ini:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta P_n^{(k)} \\ \Delta Q_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta Q_n^{(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial \delta_n} & \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial |V_n|} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial \delta_n} & \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial |V_n|} \\ \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial \delta_n} & \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial |V_n|} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial \delta_n} & \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial |V_n|} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta \delta_n^{(k)} \\ \Delta |V_2^{(k)}| \\ \vdots \\ \Delta |V_n^{(k)}| \end{bmatrix}$$

(2-27)

Disini diasumsikan bahwa bus-1 adalah *slack bus*. Matriks Jacobian memberikan perbandingan linier antara perubahan pada sudut tegangan $\Delta \delta_i^{(k)}$ dan besar tegangan $\Delta |V_i^{(k)}|$ dengan sedikit perubahan pada daya aktif ($\Delta P_i^{(k)}$) dan daya reaktif ($\Delta Q_i^{(k)}$). Sehingga dalam bentuk singkat dapat ditulis seperti pada persamaan dibawah ini:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} \quad (2-28)$$

Pada persamaan (2-28), banyaknya elemen matriks Jacobian dapat ditentukan dengan $(2n-2-m) \times (2n-2-m)$. J_1 didapatkan dari $(n-1) \times (n-1)$, J_2 didapatkan dari $(n-1) \times (n-1-m)$, J_3 didapatkan dari $(n-1-m) \times (n-1)$, dan J_4 didapatkan dari $(n-1-m) \times (n-1-m)$,

Dimana,

n = banyaknya bus dalam sistem,

m = banyaknya *voltage-controlled buses* pada sistem

Elemen untuk J_1 , yaitu:

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2-29)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} = -|V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j), \quad j \neq i \quad (2-30)$$

Elemen untuk J_2 , yaitu:

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_i|} = 2|V_i||Y_{ii}| \cos(\theta_{ii}) + \sum_{j \neq i} |V_j||Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2-31)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_j|} = |V_i||Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j), \quad j \neq i \quad (2-32)$$

Elemen untuk J_3 , yaitu:

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} = \sum_{j \neq i} |V_i||V_j||Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2-33)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_j} = -|V_i||V_j||Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j), \quad j \neq i \quad (2-34)$$

Elemen untuk J_4 , yaitu:

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_i|} = -2|V_i||Y_{ii}| \sin(\theta_{ii}) + \sum_{j \neq i} |V_j||Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2-35)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_j|} = -|V_i||Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j), \quad j \neq i \quad (2-36)$$

Pada penjelasan diatas diketahui bahwa nilai harga $\Delta P_i^{(k)}$ dan $\Delta Q_i^{(k)}$ berbeda antara yang terjadwal dengan nilai perhitungan, maka ini disebut dengan sisa daya (*power residuals*) yang diberikan dengan:

$$\Delta P_i^{(k)} = P_i^{sch} - P_i^{(k)} \quad (2-37)$$

$$\Delta Q_i^{(k)} = Q_i^{sch} - Q_i^{(k)} \quad (2-38)$$

Perhitungan baru untuk sudut fasa dan tegangan bus adalah:

$$\delta_i^{(k+1)} = \delta_i^{(k)} + \Delta \delta_i^{(k)} \quad (2-39)$$

$$|V_i^{(k+1)}| = |V_i^{(k)}| + \Delta |V_i^{(k)}| \quad (2-40)$$

Proses iterasi akan selesai setelah:

$$\begin{aligned} |\Delta P_i^{(k)}| &\leq \epsilon \\ |\Delta Q_i^{(k)}| &\leq \epsilon \end{aligned} \quad (2.41)$$

Prosedur penyelesaian studi aliran daya menggunakan metode *Newton-Rhapson* akan dijelaskan sebagai berikut:

1. Pada bus berbeda dimana P_i^{sch} dan Q_i^{sch} harga nilainya ditentukan. Besar sudut fasa dan tegangan disamakan seperti *slack bus* (1,0 dan 0,0) jadi $|V_i^{(0)}| = 1.0$ dan $\delta_i^{(0)} = 0.0$. untuk *voltage regulate bus* dimana $|V_i|$ dan P_i^{sch} diatur, sedangkan sudut fasa disamakan dengan sudut *slack bus*, $\delta_i^{(0)} = 0$.

2. Hitung $P_i^{(k)}$ dan $Q_i^{(k)}$ pada bus berbeban dengan persamaan (2-25) dan (2-26), dan juga $\Delta P_i^{(k)}$ dan $\Delta Q_i^{(k)}$ diselesaikan dengan menggunakan persamaan (2-37) dan (2-38).
3. Hitung $P_i^{(k)}$ dan $\Delta P_i^{(k)}$ pada *voltage controlled buses* dengan persamaan (2-25) dan (2-26).
4. Hitung elemen-elemen Matriks Jacobian; J_1, J_2, J_3 , dan J_4 dengan persamaan (2-29) sampai dengan persamaan (2-36).
5. Hitung harga $\Delta \delta_i^{(k)}$ dan $\Delta |V_i^{(k)}|$ dengan persamaan (2-28).
6. Hitung harga-harga baru dari sudut fasa dan tegangan $\delta_i^{(k+1)}$ dan $|V_i^{(k+1)}|$ dengan persamaan (2-39) dan (2-40).
7. Hitung proses ini hingga:

$$|V_i^{(k+1)} - V_i^{(k)}| \leq \epsilon$$

2.3.5 Rugi-rugi Daya Pada Sistem Distribusi

Dalam proses penyaluran tenaga listrik ke para pelanggan (dimulai dari pembangkit, transmisi dan distribusi) terjadi rugi-rugi teknis (*losses*) yaitu rugi daya dan rugi energi. Penulis hanya akan menjelaskan tentang rugi-rugi daya. Rugi-rugi daya listrik dikategorikan 2 (dua) bagian, yaitu rugi-rugi daya aktif dan daya reaktif (Belly, dkk (2010)):

1. Daya aktif

Daya aktif (*Active Power*) (P) adalah daya yang terpakai untuk melakukan energi sebenarnya. Satuan daya aktif adalah Watt (W), hasil perkalian tegangan - V (Volt), arus - I (Ampere), dan faktor daya ($\text{Cos } \phi$). Misalnya, energi panas, cahaya, mekanik dan lain - lain.

$$P = V \cdot I \cdot \text{Cos } \phi \quad , \quad \text{untuk 1 fasa.} \quad (2.42)$$

$$P = V \cdot I \cdot \sqrt{3} \text{ Cos } \phi \quad , \quad \text{untuk 3 fasa.} \quad (2.43)$$

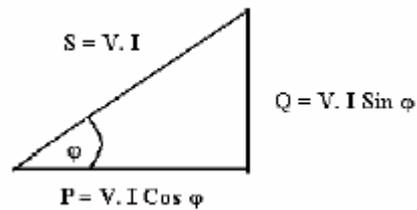
Daya ini digunakan secara umum oleh konsumen dan dikonversikan dalam bentuk kerja.

2. Daya Reaktif

Daya reaktif adalah jumlah daya yang diperlukan untuk pembentukan medan magnet. Dari pembentukan medan magnet maka akan terbentuk *fluks* medan magnet. Contoh daya yang menimbulkan daya reaktif adalah transformator, motor, lampu pijar dan lain - lain. Satuan daya reaktif adalah Var.

$$Q = V \cdot I \cdot \sin \varphi \quad , \quad \text{untuk 1 fasa.} \quad (2.44)$$

$$Q = V \cdot I \cdot \sqrt{3} \sin \varphi \quad , \quad \text{untuk 3 fasa.} \quad (2.45)$$



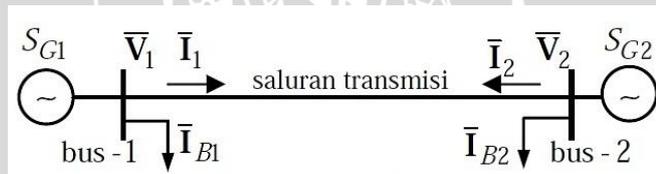
Gambar 2.6 Penjumlahan Trigonometri Daya Aktif, Reaktif dan Semu
(Sumber: Belly, dkk (2010))

Daya yang dihasilkan oleh perkalian antara tegangan rms dan arus rms dalam suatu jaringan atau daya yang merupakan hasil penjumlahan trigonometri daya aktif dan daya reaktif disebut daya nyata (*Apparent Power*). Satuan daya nyata adalah VA.

$$S = P + jQ, \text{ mempunyai nilai/ besar dan sudut.} \quad (2.46)$$

$$S = S \angle \varphi \quad (2.47)$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (2.48)$$



Gambar 2.7 Diagram segaris sistem dengan dua (2) bus
(Sumber: Sudirham, S., 2012:203)

Dimana,

S_{G1}, S_{G2} = daya per fasa generator.

\bar{V}_1, \bar{V}_2 = tegangan fasa-netral.

\bar{I}_1, \bar{I}_2 , = arus ke saluran transmisi dari bus -1 dan bus - 2.

$\bar{I}_{B1}, \bar{I}_{B2}$, = arus beban (langsung) dari bus -1 dan bus - 2.

Sistem dengan dua bus, bus-1 (bus-generator nomer-1) yang terhubung melalui saluran transmisi ke bus-2 (bus-generator nomer-2). Diagram satu garis dan model satu-fasa terlihat pada Gb.2.7.

$$S_{12} = P_{12} + jQ_{12} \quad (2.49)$$

$$S_{21} = P_{21} + jQ_{21} \quad (2.50)$$

$$\Delta S = S_{\text{Losses}} = S_{21} - S_{12} \quad (2.51)$$

2.3.6 Sistem Per Unit

Saluran transmisi tenaga dioperasikan pada tingkat tegangan dimana kilovolt merupakan unit yang sangat memudahkan untuk menyatakan tegangan. Karena besarnya daya yang harus disalurkan dengan satuan kilowatt atau megawatt dan kilovolt-ampere atau megavolt-ampere adalah istilah-istilah yang sudah biasa dipakai. Misalnya, jika sebagai tegangan dasar dipilih 120 kV, maka tegangan-tegangan sebesar 108, 120 dan 126 kV berturut-turut menjadi 0,90, 1,00 dan 1,05. Definisi nilai per unit untuk suatu kuantitas ialah perbandingan kuantitas tersebut terhadap nilai dasarnya yang dinyatakan dalam desimal (Stevenson, 1996: 31).

Nilai basis untuk impedansi ditentukan menggunakan relasi (Sudirham, S., 2012:47) :

$$Z_{basis} = \frac{V_{basis}}{I_{basis}} = \frac{V_{basis}^2}{S_{basis}} \quad (2.52)$$

Dimana, Z_{basis} = Impedansi dasar

V_{basis} = Tegangan dasar

I_{basis} = Arus dasar

S_{basis} = Daya kompleks dasar

Apabila pada tegangan dan daya yang digunakan adalah tegangan dan daya 3 fasa, maka perhitungan nilai dasar menggunakan rumus-rumus berikut (Stevenson, 1996: 31):

$$\text{Impedansi dasar} = \frac{(\text{tegangan dasar, } kV_{LL}/\sqrt{3})^2 \times 1000}{kVA_{3\phi} \text{ dasar}} \quad (2.53)$$

$$\text{Impedansi dasar} = \frac{(\text{tegangan dasar, } kV_{LL})^2 \times 1000}{kVA_{3\phi} \text{ dasar}} \quad (2.54)$$

$$\text{Impedansi dasar} = \frac{(\text{tegangan dasar, } kV_{LL})^2}{MVA_{3\phi} \text{ dasar}} \quad (2.55)$$

BAB III

METODE PENELITIAN

Metodologi penelitian memberikan gambaran urutan langkah-langkah yang dilaksanakan untuk mencapai tujuan penyusunan skripsi. Adapun urutan langkah-langkah penyusunan skripsi ini adalah sebagai berikut:

3.1 Studi Literatur

Dalam penyusunan karya tulis ini, pengumpulan data dilakukan dengan melakukan studi literatur (*library research*) dengan sasaran tinjauan antara lain :

1. Pustaka-pustaka referensi.
2. Informasi internet.
3. Pustaka penunjang.

Studi literatur yang dilakukan bertujuan untuk mengkaji hal-hal yang berhubungan dengan teori-teori yang mendukung dalam penelitian. Adapun teori-teori yang dikaji adalah sebagai berikut:

1. Teori dasar tentang Pembangkit Tersebar.
2. Teori dasar tentang studi aliran daya untuk menghitung rugi-rugi daya.
3. Studi perangkat lunak PSAT

Studi literatur digunakan untuk mengetahui dasar teori dan beberapa hal lain yang meliputi :

1. Studi literatur mengenai Pembangkit Tersebar yang meliputi dasar teori, jenis, manfaat, aplikasi, dan perkembangan.
2. Studi literatur mengenai studi aliran daya yang meliputi dasar teori, parameter, manfaat, dan tekniknya.

3.2 Pengumpulan Data

Data yang diperlukan pada penelitian ini antara lain:

1. Data primer: data yang didapat dari hasil pengamatan dan survei lapangan, meliputi *single line diagram* sistem distribusi beserta parameter yaitu data teknis transformator pada gardu induk Turen, profil beban gardu tiang distribusi, data kabel penghantar pada penyulang, dan profil tegangan pada penyulang/bus.

2. Data sekunder: data yang bersumber dari buku referensi, jurnal, skripsi, dan internet.

Data-data tersebut selanjutnya dianalisis dan dievaluasi menggunakan penyelesaian aliran daya metode *Newton-Raphson*, untuk mengetahui nilai parameter tegangan sistem $|V|$, sudut fasa tegangan (δ), daya aktif (P), daya reaktif (Q), rugi-rugi daya aktif (P_{Loss}) dan daya reaktif (Q_{Loss}).

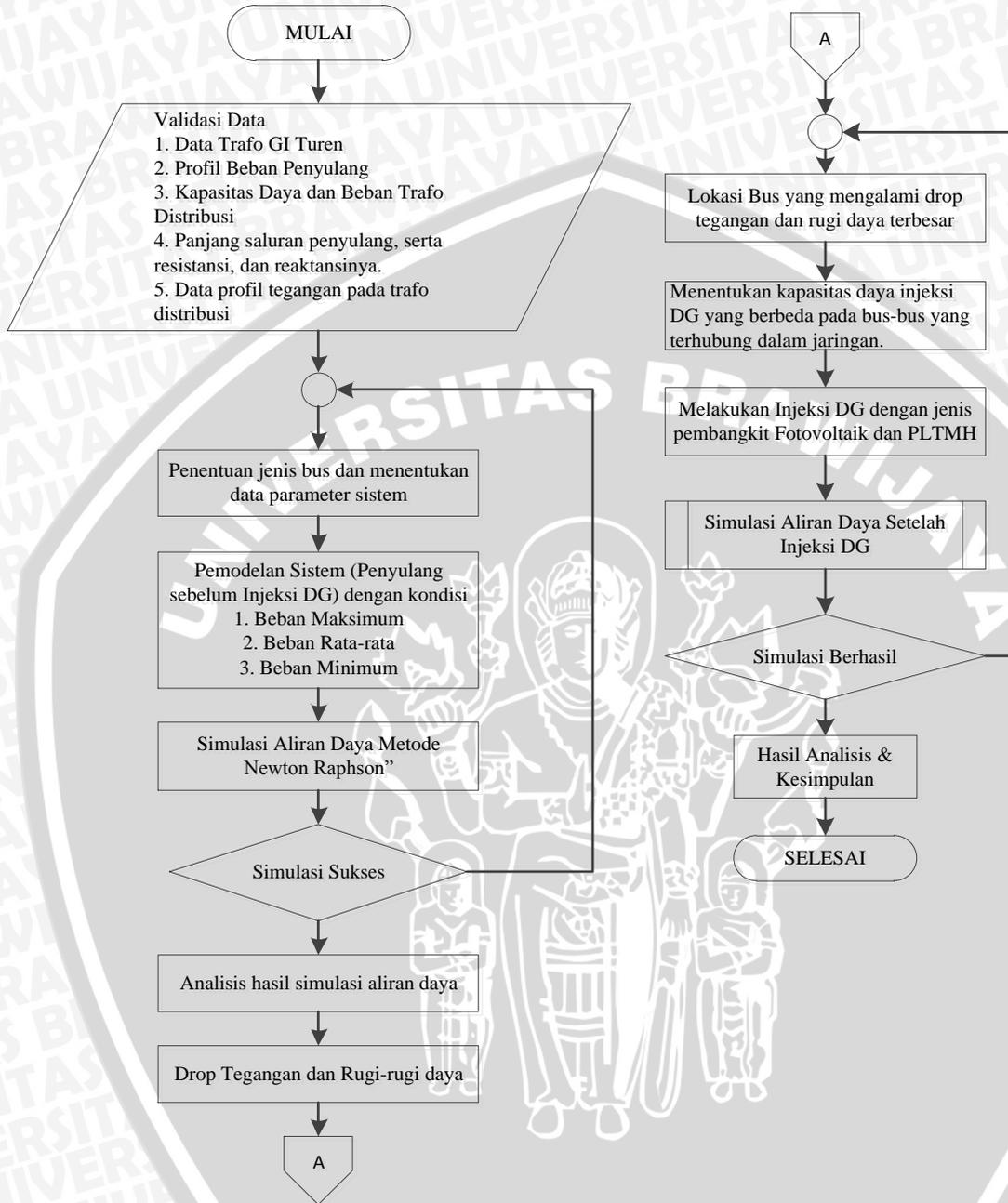
3.3 Pemodelan Sistem

Pemodelan sistem dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak *PSAT (Power System Analysis Toolbox) 2.1.8* yang berfungsi untuk memodelkan kondisi sistem sesuai dengan tujuan penelitian.

3.4 Tahapan Simulasi

1. Melakukan validasi data dokumenter dan selanjutnya menentukan nilai dasar dan parameter simulasi. Data dokumenter yang divalidasi yaitu data trafo GI. Turen, data pembebanan salah satu penyulang, data kapasitas dan pembebanan gardu tiang distribusi, data saluran penyulang (panjang saluran, resistansi, dan reaktansi)
2. Menampilkan gambar *single line* sistem daya.
3. Melakukan pemodelan sistem sesuai *single line* dan menginput beberapa parameter analisisnya.
4. Melakukan simulasi aliran daya pada model awal sistem daya (sebelum injeksi daya oleh Pembangkit Tersebar) pada kondisi beban maksimum, rata-rata, dan beban minimum.
5. Analisis hasil simulasi aliran daya sebagai bahan evaluasi injeksi daya oleh Pembangkit Tersebar.
6. Menganalisis besar penurunan tegangan dan rugi daya sistem sebelum injeksi pada kondisi beban maksimum, rata-rata, dan beban minimum.
7. Lokasi injeksi diambil pada bus yang memiliki rugi daya dan penurunan tegangan yang cukup besar.
8. Menentukan kapasitas daya injeksi yang berbeda pada bus-bus yang terhubung dalam jaringan.
9. Melakukan injeksi Pembangkit Tersebar pada bus-bus yang terpilih.
10. Menganalisis besar rugi daya sistem setelah injeksi Pembangkit Tersebar.
11. Pengambilan kesimpulan dan saran.

3.5 Diagram Alir Metodologi Penelitian



Gambar 2.8 Diagram Alir Metodologi Penelitian

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Sistem Distribusi 20 kV Penyulang Dampit

Penerapan Pembangkit Tersebar pada salah satu bus yang terdapat pada penyulang Dampit Kabupaten Malang dilakukan dengan menggunakan data-data dari Unit Pelayanan Jaringan (UPJ) Dampit Kabupaten Malang. Data yang digunakan sebagai parameter simulasi merupakan data tahun 2013. Penyulang Dampit terdiri dari 70 gardu distribusi yang menyalurkan daya ke beban pelanggan umum (masyarakat umum) maupun beban pelanggan khusus (Kantor dan Pabrik). Pada tahapan pemodelan sistem Dampit diperoleh jumlah bus sebanyak 71 Bus dan jumlah saluran sebanyak 72 yang saling terhubung.

4.1.1 Data Transformator Gardu Induk Turen

Penyulang Dampit disuplai dari Transformator pada Gardu Induk Turen Kab. Malang.

Tabel 4.1. Data Tranformator Gardu Induk Turen

Parameter	Nilai	Satuan
Daya Semu (S)	30	MVA
Daya Semu (Sbase)	100	MVA [base]
Cos phi	0.97	
Daya Aktif (P)	29.1	MW
	0.291	p.u
Daya Reaktif (Q)	7.293	MVar
	0.07293	p.u

(Sumber : Data PT. PLN (Persero) UPJ Dampit 2013)

4.1.2 Data Saluran Penyulang Dampit

Penyulang Dampit memiliki panjang saluran udara tegangan menengah 72.619 kMs (Kilometer sirkuit) yang terdiri dari beberapa jenis penghantar. Berikut disajikan pada tabel 4.2. Data jenis penghantar saluran penyulang Dampit dan tabel 4.3. Data penghantar antar bus.

Tabel 4.2. Data saluran penyulang Dampit

Jenis Penghantar	Luas Penampang (m ²)			Jumlah	Satuan
	70	120	150		
XLPE			211	115	Ms
AAACS			32010	32010	Ms
AAAC	32949	7449		40398	Ms
Total Panjang SUTM				72.619	kMs

(Sumber : Data PT. PLN (Persero) UPJ Dampit 2013)

Tabel 4.3. Data Penghantar antar Bus Penyulang Dampit

Bus		Resistansi "R"		Reaktansi "X"	
Kirim	Terima	Ohm	p.u	Ohm	p.u
2	3	0.0207	0.0004	0.0806	0.0017
3	4	0.2681	0.0057	0.4098	0.0087
4	5	0.2512	0.0053	0.3840	0.0082
4	12	0.1600	0.0034	0.2446	0.0052
5	6	0.2744	0.0058	0.4194	0.0089
6	7	0.2735	0.0058	0.4181	0.0089
7	8	0.4576	0.0058	0.3547	0.0045
8	9	0.1325	0.0028	0.2026	0.0043
9	10	0.2492	0.0045	0.3130	0.0057
11	10	0.2446	0.0045	0.3072	0.0056
12	13	0.6895	0.0147	1.0540	0.0224
13	14	0.1511	0.0032	0.2310	0.0049
14	15	0.1604	0.0034	0.2452	0.0052
14	16	0.1394	0.0030	0.2132	0.0045
16	17	0.1587	0.0034	0.2426	0.0052
18	17	0.2594	0.0055	0.3966	0.0084
19	18	0.2123	0.0045	0.3246	0.0069
20	18	0.2951	0.0063	0.4511	0.0096
21	20	0.2683	0.0057	0.4102	0.0087
23	22	0.2378	0.0051	0.3636	0.0077
17	22	0.3118	0.0066	0.4766	0.0101
17	24	0.2975	0.0063	0.4548	0.0097
24	25	0.2930	0.0053	0.3680	0.0067
73	33	0.2325	0.0042	0.2920	0.0053
25	26	0.2293	0.0042	0.2880	0.0053
25	73	0.1539	0.0033	0.2353	0.0050
26	27	0.2822	0.0052	0.3545	0.0065
26	28	0.3064	0.0056	0.3849	0.0070
28	29	0.2718	0.0058	0.4154	0.0088
29	31	0.2871	0.0061	0.4389	0.0093
29	30	0.2789	0.0059	0.4263	0.0091
31	32	0.2545	0.0054	0.3890	0.0083
33	34	0.2789	0.0059	0.4263	0.0091
34	37	0.1634	0.0035	0.2499	0.0053
34	35	0.3070	0.0065	0.4693	0.0100
35	36	0.2614	0.0056	0.3996	0.0085

Bus		Resistansi "R"		Reaktansi "X"	
Kirim	Terima	Ohm	p.u	Ohm	p.u
37	38	0.1018	0.0022	0.1557	0.0033
38	39	0.2594	0.0055	0.3966	0.0084
39	40	0.3446	0.0073	0.5268	0.0112
41	37	0.2393	0.0051	0.3659	0.0078
41	42	0.2790	0.0051	0.3504	0.0064
42	43	0.3051	0.0056	0.3832	0.0070
43	44	0.2121	0.0045	0.3242	0.0069
43	45	0.2084	0.0044	0.3186	0.0068
45	46	0.2994	0.0064	0.4577	0.0097
47	45	0.4860	0.0089	0.6104	0.0111
47	48	0.1686	0.0036	0.2578	0.0055
48	52	0.1591	0.0034	0.2432	0.0052
58	47	0.1894	0.0040	0.2895	0.0062
49	48	0.1803	0.0038	0.2756	0.0059
50	48	0.1163	0.0025	0.1778	0.0038
52	53	0.2746	0.0058	0.4197	0.0089
51	50	0.2212	0.0047	0.3381	0.0072
52	54	0.2238	0.0048	0.3421	0.0073
54	55	0.1487	0.0032	0.2274	0.0048
54	56	0.1247	0.0027	0.1907	0.0041
56	57	0.3021	0.0055	0.3795	0.0069
59	58	0.2747	0.0050	0.3450	0.0063
59	60	0.3226	0.0041	0.2500	0.0032
61	47	0.1989	0.0036	0.2498	0.0046
62	61	0.4207	0.0054	0.3261	0.0042
66	62	0.3603	0.0046	0.2793	0.0036
63	62	0.4516	0.0058	0.3501	0.0045
64	63	0.5106	0.0065	0.3958	0.0050
65	63	0.4576	0.0058	0.3547	0.0045
67	66	0.5622	0.0072	0.4358	0.0056
68	67	0.2705	0.0034	0.2097	0.0027
69	68	0.3018	0.0038	0.2340	0.0030
69	70	0.3788	0.0048	0.2936	0.0037
71	67	0.1940	0.0025	0.1504	0.0019
71	72	0.2769	0.0051	0.3477	0.0063

(Sumber : Hasil Perhitungan)

4.2 Hasil Analisis Aliran Daya Menggunakan Metode "Newton Raphson" Sebelum Injeksi Pembangkit Tersebar.

Analisis aliran daya metode *Newton Raphson* pada pemodelan sistem Dampit dengan menggunakan komputasi PSAT 2.1.8. Pemodelan sistem Dampit dilakukan dengan menggunakan data berdasarkan tiga (3) skenario pembebanan pada penyulang tersebut. Skenario pembebanan tersebut meliputi pembebanan Maksimal (100%), beban

rata-rata (60%), dan beban minimum (40%). Berikut dijelaskan hasil analisis dari ketiga kondisi pembebanan sistem dampit tersebut.

4.2.1 Analisis Aliran Daya Kondisi Beban Maksimum (100%)

Berikut ditampilkan hasil analisis aliran daya sesuai pemodelan sistem Dampit pada kondisi beban maksimum.

Tabel 4.4 Hasil Analisis Aliran Daya Beban Maksimum 100%

Bus	V p.u	Phasa rad	Pgen MW	Qgen MVar	Pload MW	Qload MVar
1	1.000	0.000	3.9874	4.3702	0	0
2	0.970	-0.026	0	0	0	0
3	0.969	-0.027	0	0	0	0
4	0.962	-0.028	0	0	0.03256	0.03322
5	0.961	-0.028	0	0	0.04362	0.0445
6	0.961	-0.028	0	0	0.09008	0.0919
7	0.960	-0.028	0	0	0.03954	0.04034
8	0.960	-0.028	0	0	0.03094	0.03158
9	0.960	-0.028	0	0	0.05878	0.05997
10	0.960	-0.028	0	0	0.0337	0.03438
11	0.960	-0.028	0	0	0.01564	0.01595
12	0.958	-0.029	0	0	0.10522	0.10735
13	0.942	-0.032	0	0	0.03954	0.04034
14	0.938	-0.033	0	0	0.10184	0.1039
15	0.938	-0.033	0	0	0.03984	0.04064
16	0.935	-0.033	0	0	0.03674	0.03748
17	0.931	-0.034	0	0	0.12618	0.12873
18	0.931	-0.034	0	0	0.02537	0.02588
19	0.931	-0.034	0	0	0.10522	0.10734
20	0.931	-0.034	0	0	0.10603	0.10816
21	0.931	-0.034	0	0	0.03712	0.03787
22	0.931	-0.034	0	0	0.0412	0.04203
23	0.931	-0.034	0	0	0.06488	0.06625
24	0.926	-0.035	0	0	0.0607	0.06193
25	0.921	-0.036	0	0	0.12835	0.13095
26	0.920	-0.036	0	0	0.12312	0.1256
27	0.920	-0.036	0	0	0.04848	0.04946
28	0.920	-0.036	0	0	0.09942	0.10143
29	0.919	-0.036	0	0	0.16808	0.17147
30	0.919	-0.036	0	0	0.00955	0.00974
31	0.919	-0.036	0	0	0.04366	0.04454
32	0.919	-0.036	0	0	0.07025	0.07169
33	0.917	-0.037	0	0	0.16809	0.17148
34	0.913	-0.037	0	0	0.10602	0.10816
35	0.913	-0.037	0	0	0.06068	0.06192
36	0.913	-0.037	0	0	0.03016	0.03072
37	0.912	-0.038	0	0	0.026	0.0266
38	0.911	-0.038	0	0	0.011	0.01122
39	0.911	-0.038	0	0	0.24676	0.25175
40	0.911	-0.038	0	0	0.06437	0.06568
41	0.910	-0.038	0	0	0.04366	0.04454
42	0.908	-0.038	0	0	0.06111	0.06235
43	0.906	-0.038	0	0	0.03256	0.03322

Bus	V p.u	Phasa rad	Pgen MW	Qgen MVar	Pload MW	Qload MVar
44	0.906	-0.038	0	0	0.09008	0.0919
45	0.905	-0.039	0	0	0.05679	0.05794
46	0.905	-0.039	0	0	0.03418	0.03487
47	0.902	-0.039	0	0	0.02696	0.0275
48	0.902	-0.039	0	0	0.02791	0.02847
49	0.902	-0.039	0	0	0.03392	0.03461
50	0.902	-0.039	0	0	0.00442	0.00451
51	0.902	-0.039	0	0	0.1524	0.15549
52	0.902	-0.039	0	0	0.01379	0.01407
53	0.902	-0.039	0	0	0.02706	0.02761
54	0.902	-0.039	0	0	0.02046	0.02087
55	0.902	-0.039	0	0	0.00945	0.00964
56	0.902	-0.039	0	0	0.00866	0.00883
57	0.902	-0.039	0	0	0.02736	0.02791
58	0.902	-0.039	0	0	0.10602	0.10817
59	0.902	-0.039	0	0	0.00611	0.00623
60	0.902	-0.039	0	0	0.02108	0.02151
61	0.902	-0.039	0	0	0.10602	0.10817
62	0.902	-0.039	0	0	0.01379	0.01407
63	0.902	-0.039	0	0	0.01819	0.01856
64	0.902	-0.039	0	0	0.03607	0.0368
65	0.902	-0.039	0	0	0.02038	0.02079
66	0.902	-0.039	0	0	0.01357	0.01384
67	0.901	-0.039	0	0	0.00893	0.00911
68	0.901	-0.039	0	0	0.01877	0.01915
69	0.901	-0.039	0	0	0.00787	0.00803
70	0.901	-0.039	0	0	0.00557	0.00568
71	0.901	-0.039	0	0	0.00894	0.00911
72	0.901	-0.039	0	0	0.02122	0.02165

Total Pembangkitan yaitu $P = 0.0398$ p.u dan $Q = 0.0437$ p.u. Total Pembebanan yaitu $P = 0.0381$ p.u dan $Q = 0.0389$ p.u. Total losses $P = 0.00173$ p.u (4%) dan 0.00477 . p.u (11%). Drop tegangan terjadi pada penyulang sebesar 10% pada bus 45 sampai bus 72.

4.2.2 Analisis Aliran Daya Kondisi Beban Rata-rata (60%)

Berikut ditampilkan hasil analisis aliran daya sesuai pemodelan sistem Dampit pada kondisi beban rata-rata.

Tabel 4.5 Hasil Analisis Aliran Daya Beban Rata-Rata 60%

Bus	V p.u	Phasa rad	Pgen MW	Qgen MVar	Pload MW	Qload MVar
1	1.000	0.000	2.3459	2.4946	0	0
2	0.983	-0.015	0	0	0	0
3	0.982	-0.015	0	0	0	0
4	0.978	-0.016	0	0	0.01954	0.01992
5	0.978	-0.016	0	0	0.02617	0.0267
6	0.977	-0.016	0	0	0.05405	0.05514

Bus	V p.u	Phasa rad	Pgen MW	Qgen MVar	Pload MW	Qload MVar
7	0.977	-0.016	0	0	0.02373	0.02421
8	0.977	-0.016	0	0	0.01858	0.01894
9	0.977	-0.016	0	0	0.03527	0.03598
10	0.977	-0.016	0	0	0.02022	0.02063
11	0.977	-0.016	0	0	0.00938	0.00957
12	0.976	-0.017	0	0	0.06312	0.0644
13	0.966	-0.019	0	0	0.02372	0.0242
14	0.964	-0.019	0	0	0.0611	0.06234
15	0.964	-0.019	0	0	0.0239	0.02438
16	0.963	-0.019	0	0	0.02204	0.02249
17	0.961	-0.020	0	0	0.07571	0.07723
18	0.960	-0.020	0	0	0.01522	0.01553
19	0.960	-0.020	0	0	0.06314	0.06442
20	0.960	-0.020	0	0	0.06362	0.0649
21	0.960	-0.020	0	0	0.02227	0.02272
22	0.960	-0.020	0	0	0.02472	0.02522
23	0.960	-0.020	0	0	0.03887	0.03975
24	0.957	-0.020	0	0	0.03642	0.03715
25	0.955	-0.021	0	0	0.077	0.07858
26	0.954	-0.021	0	0	0.07386	0.07536
27	0.954	-0.021	0	0	0.02909	0.02968
28	0.954	-0.021	0	0	0.05965	0.06085
29	0.953	-0.021	0	0	0.10085	0.1029
30	0.953	-0.021	0	0	0.00573	0.00584
31	0.953	-0.021	0	0	0.0262	0.02672
32	0.953	-0.021	0	0	0.04213	0.04305
33	0.952	-0.021	0	0	0.10085	0.10289
34	0.950	-0.022	0	0	0.06362	0.0649
35	0.950	-0.022	0	0	0.03642	0.03714
36	0.950	-0.022	0	0	0.01808	0.01848
37	0.949	-0.022	0	0	0.0156	0.016
38	0.949	-0.022	0	0	0.0066	0.00673
39	0.949	-0.022	0	0	0.14806	0.15105
40	0.949	-0.022	0	0	0.03862	0.03941
41	0.948	-0.022	0	0	0.02619	0.02672
42	0.947	-0.022	0	0	0.03667	0.03741
43	0.946	-0.022	0	0	0.01954	0.01994
44	0.946	-0.022	0	0	0.05405	0.05514
45	0.945	-0.022	0	0	0.03408	0.03476
46	0.945	-0.022	0	0	0.02051	0.02092
47	0.944	-0.022	0	0	0.01618	0.0165
48	0.944	-0.022	0	0	0.01674	0.01708
49	0.944	-0.023	0	0	0.02035	0.02076
50	0.944	-0.023	0	0	0.00265	0.00271
51	0.943	-0.023	0	0	0.09144	0.0933
52	0.944	-0.023	0	0	0.00827	0.00844
53	0.944	-0.023	0	0	0.01624	0.01656
54	0.944	-0.023	0	0	0.01227	0.01252
55	0.944	-0.023	0	0	0.00567	0.00578
56	0.944	-0.023	0	0	0.0052	0.0053
57	0.943	-0.023	0	0	0.01641	0.01674
58	0.944	-0.022	0	0	0.06362	0.0649
59	0.944	-0.022	0	0	0.00367	0.00374

Bus	V p.u	Phasa rad	Pgen MW	Qgen MVar	Pload MW	Qload MVar
60	0.944	-0.022	0	0	0.01265	0.0129
61	0.944	-0.022	0	0	0.06362	0.0649
62	0.943	-0.022	0	0	0.00827	0.00844
63	0.943	-0.022	0	0	0.01091	0.01113
64	0.943	-0.022	0	0	0.02165	0.02208
65	0.943	-0.022	0	0	0.01222	0.01247
66	0.943	-0.022	0	0	0.00814	0.00831
67	0.943	-0.022	0	0	0.00536	0.00547
68	0.943	-0.022	0	0	0.01127	0.01149
69	0.943	-0.022	0	0	0.00472	0.00482
70	0.943	-0.022	0	0	0.00334	0.00341
71	0.943	-0.022	0	0	0.00536	0.00547
72	0.943	-0.022	0	0	0.01273	0.01299

Total Pembangkitan yaitu $P = 0.023$ p.u dan $Q = 0.0437$ p.u, Total Pembebanan yaitu $P = 0.0229$ p.u dan $Q = 0.0233$ p.u. Total losses $P = 0.00056$ p.u (2%) dan 0.00163 p.u (7%). Drop tegangan terjadi pada penyulang sebesar 6% pada bus 47 sampai pada bus 72.

4.2.3 Analisis Aliran Daya Kondisi Beban Minimum (40%)

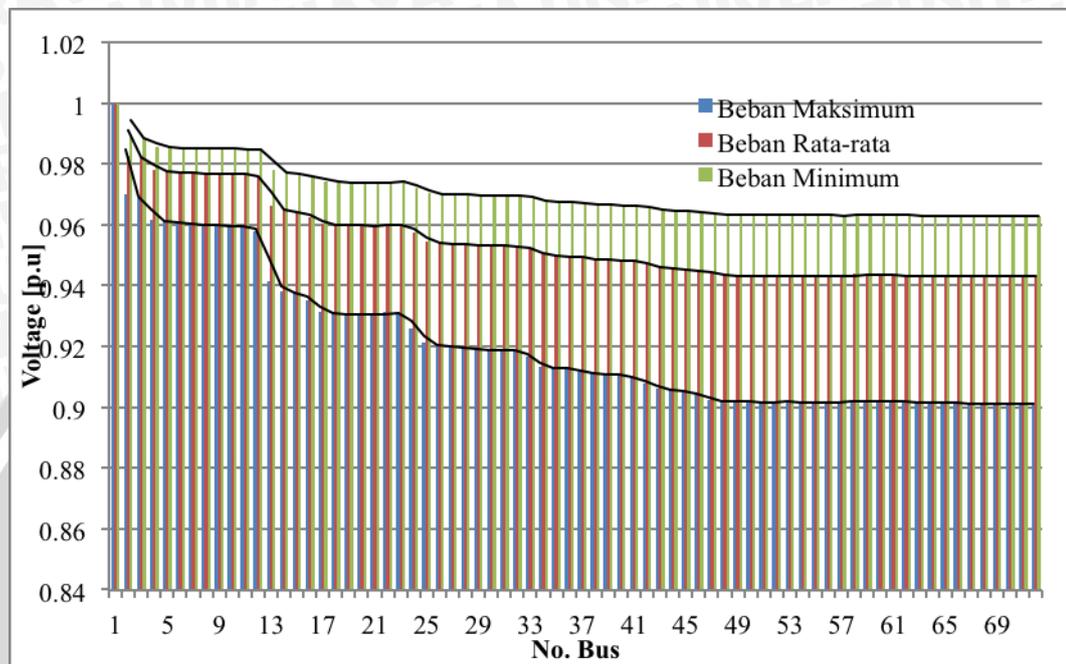
Berikut ditampilkan hasil analisis aliran daya sesuai pemodelan sistem Dampit pada kondisi beban minimum.

Tabel 4.6 Hasil Analisis Aliran Daya Beban Minimum 40%

Bus	V p.u	Phasa rad	Pgen MW	Qgen MVar	Pload MW	Qload MVar
1	1.000	0.000	1.5503	1.625	0	0
2	0.989	-0.010	0	0	0	0
3	0.988	-0.010	0	0	0	0
4	0.986	-0.011	0	0	0.01302	0.01328
5	0.985	-0.011	0	0	0.01744	0.0178
6	0.985	-0.011	0	0	0.03603	0.03676
7	0.985	-0.011	0	0	0.01582	0.01613
8	0.985	-0.011	0	0	0.01238	0.01262
9	0.985	-0.011	0	0	0.02351	0.02399
10	0.985	-0.011	0	0	0.01348	0.01376
11	0.985	-0.011	0	0	0.00626	0.00638
12	0.984	-0.011	0	0	0.0421	0.04295
13	0.978	-0.012	0	0	0.01582	0.01614
14	0.977	-0.012	0	0	0.04074	0.04156
15	0.977	-0.012	0	0	0.01594	0.01626
16	0.975	-0.013	0	0	0.0147	0.01499
17	0.974	-0.013	0	0	0.05047	0.05149
18	0.974	-0.013	0	0	0.01015	0.01036
19	0.974	-0.013	0	0	0.0421	0.04294
20	0.974	-0.013	0	0	0.04242	0.04326
21	0.974	-0.013	0	0	0.01485	0.01515
22	0.974	-0.013	0	0	0.01648	0.01682

Bus	V p.u	Phasa rad	Pgen MW	Qgen MVar	Pload MW	Qload MVar
23	0.974	-0.013	0	0	0.026	0.0265
24	0.972	-0.013	0	0	0.02428	0.02477
25	0.970	-0.014	0	0	0.05135	0.05238
26	0.970	-0.014	0	0	0.04924	0.05024
27	0.970	-0.014	0	0	0.01939	0.01979
28	0.970	-0.014	0	0	0.03977	0.04057
29	0.970	-0.014	0	0	0.06722	0.0686
30	0.970	-0.014	0	0	0.00382	0.0039
31	0.969	-0.014	0	0	0.01746	0.01782
32	0.969	-0.014	0	0	0.02812	0.02863
33	0.969	-0.014	0	0	0.06723	0.06859
34	0.967	-0.014	0	0	0.04242	0.04326
35	0.967	-0.014	0	0	0.02428	0.02476
36	0.967	-0.014	0	0	0.01208	0.01232
37	0.967	-0.014	0	0	0.0104	0.0106
38	0.967	-0.014	0	0	0.0044	0.00449
39	0.966	-0.014	0	0	0.09871	0.1007
40	0.966	-0.014	0	0	0.02574	0.02627
41	0.966	-0.014	0	0	0.01747	0.01782
42	0.965	-0.014	0	0	0.02445	0.02494
43	0.965	-0.015	0	0	0.01302	0.01328
44	0.965	-0.015	0	0	0.03603	0.03676
45	0.964	-0.015	0	0	0.02272	0.02318
46	0.964	-0.015	0	0	0.01367	0.01395
47	0.963	-0.015	0	0	0.01078	0.01099
48	0.963	-0.015	0	0	0.01116	0.01139
49	0.963	-0.015	0	0	0.01357	0.01384
50	0.963	-0.015	0	0	0.00177	0.0018
51	0.963	-0.015	0	0	0.06096	0.06219
52	0.963	-0.015	0	0	0.00552	0.00563
53	0.963	-0.015	0	0	0.01083	0.01105
54	0.963	-0.015	0	0	0.00818	0.00835
55	0.963	-0.015	0	0	0.00378	0.00386
56	0.963	-0.015	0	0	0.00346	0.00354
57	0.963	-0.015	0	0	0.01094	0.01117
58	0.963	-0.015	0	0	0.04241	0.04327
59	0.963	-0.015	0	0	0.00244	0.00249
60	0.963	-0.015	0	0	0.00843	0.0086
61	0.963	-0.015	0	0	0.04241	0.04326
62	0.963	-0.015	0	0	0.00552	0.00563
63	0.963	-0.015	0	0	0.00728	0.00742
64	0.963	-0.015	0	0	0.01443	0.01472
65	0.963	-0.015	0	0	0.00815	0.00832
66	0.963	-0.015	0	0	0.00543	0.00554
67	0.963	-0.015	0	0	0.00357	0.00365
68	0.963	-0.015	0	0	0.00751	0.00766
69	0.963	-0.015	0	0	0.00315	0.00321
70	0.963	-0.015	0	0	0.00222	0.00227
71	0.963	-0.015	0	0	0.00358	0.00365
72	0.963	-0.015	0	0	0.00849	0.00866

Total Pembangkitan yaitu $P = 1.55$ p.u dan $Q = 1.625$ p.u, Total Pembebanan, yaitu $P = 1.52$ p.u dan $Q = 1.56$ p.u. Total losses $P = 0.0003$ p.u (2%) dan 0.0007 p.u (4%). Drop tegangan terjadi pada penyulang sebesar 4% pada bus 43 sampai pada bus 72. Berikut grafik perbandingan tegangan pada ketiga kondisi pembebanan penyulang.



Gambar 4.1. Grafik tegangan bus pada 3 kondisi pembebanan

Hasil analisis aliran daya menunjukkan kondisi tegangan penyulang dampit pada saat kondisi beban maksimum mengalami penurunan tegangan terbesar sampai dengan -10% beberapa bus. Penurunan tegangan terjadi sebagai akibat dari besarnya beban bus dan panjang saluran yang ada. Penurunan tegangan juga terjadi pada kondisi beban minimum dan rata-rata namun level tegangan masih berada pada kondisi normal. Oleh karena itu pemodelan sistem Injeksi Pembangkit Tersebar menggunakan data beban maksimum penyulang.

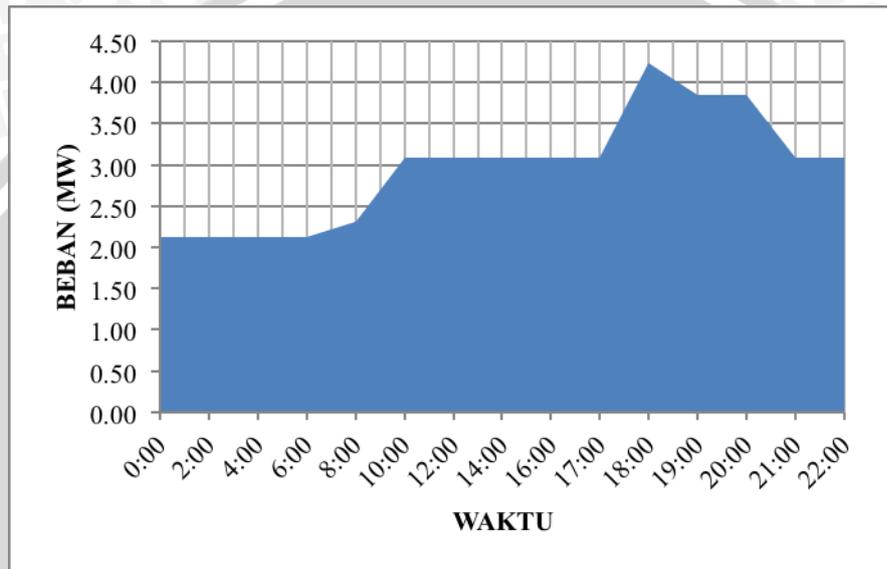
4.3 Karakteristik Beban Harian Penyulang Dampit

Tabel 4.7 Karakteristik Beban Harian Penyulang Dampit

Jam	MW
0:00	2.12
2:00	2.12
4:00	2.12
6:00	2.12
8:00	2.31
10:00	3.08
12:00	3.08

14:00	3.08
16:00	3.08
17:00	3.08
18:00	4.23
19:00	3.85
20:00	3.85
21:00	3.08
22:00	3.08

(Sumber : Data PT. PLN (Persero) UPJ Dampit 2013)



Gambar 4.2. Grafik Karakteristik Beban Harian Penyulang Dampit

4.4 Injeksi Pembangkit Tersebar

Injeksi daya Pembangkit Tersebar pada penyulang Dampit dilakukan dengan tahapan perencanaan peralatan yang digunakan. Peralatan yang digunakan merepresentasikan parameter yang digunakan pada tahapan simulasi. Tahapan simulasi atau pemodelan dilakukan menggunakan *software* komputasi PSAT 2.1.8. Berikut disajikan skenario penggunaan peralatan Pembangkit Tersebar.

4.4.1 Data Perencanaan Peralatan Pembangkit Tersebar

Tabel 4.8 Data *Typical* Generator

NAMA MODEL	GENSAL
MVA	1.8
Vintage [kV]	20
PF	0.85
Ra	0.003
T'do	6
T''do	0.04
T'''qo	0.06

H	4
D	0
X _q	1.7
X' _q	0.5
X'' _q	0.3
X _d	1.05
X' _d	0.28
X'' _d	0.18
XI	0.14
S(1.0)	0.11
S(1.2)	0.5

4.4.2 Skenario Injeksi Pembangkit Tersebar

Tabel 4.9. Skenario Lokasi dan Ukuran Pembangkit Tersebar

Skenario	Pembangkit Tersebar	Ukuran Total DG [MW]	Jumlah Pembangkit Tersebar	Lokasi Pembangkit Tersebar Pada Bus
Skenario-1	Generator 1	0.5	1	51
Skenario-2	Generator 2	1.53	1	61
Skenario-3	Generator 1	0.5	1	51
	Generator 2	0,5	1	61
Skenario-4	Generator 1	0,5	1	29
	Generator 2	0,5	1	51
	Generator 3	0,85	1	39
	Generator 4	1,53	1	61
Skenario-5	Generator 1	0,3	1	29
	Generator 2	0,3	1	45
	Generator 3	0,3	1	51
	Generator 4	0,85	1	39
	Generator 5	1,53	1	61
	Generator 6	0,68	1	69

Penentuan lokasi injeksi daya beserta ukuran daya Pembangkit Tersebar yang digunakan berdasarkan lokasi bus yang mengalami penurunan tegangan yang cukup besar. Selain itu penentuan juga berdasarkan tingkat beban bus, dimana bus yang melayani beban daya aktif reaktif cukup tinggi menjadi prioritas utama untuk menentukan lokasi dan ukuran Pembangkit Tersebar.

4.4.3 Hasil Skenario Berdasarkan Analisis Aliran Daya “Newton Raphson”

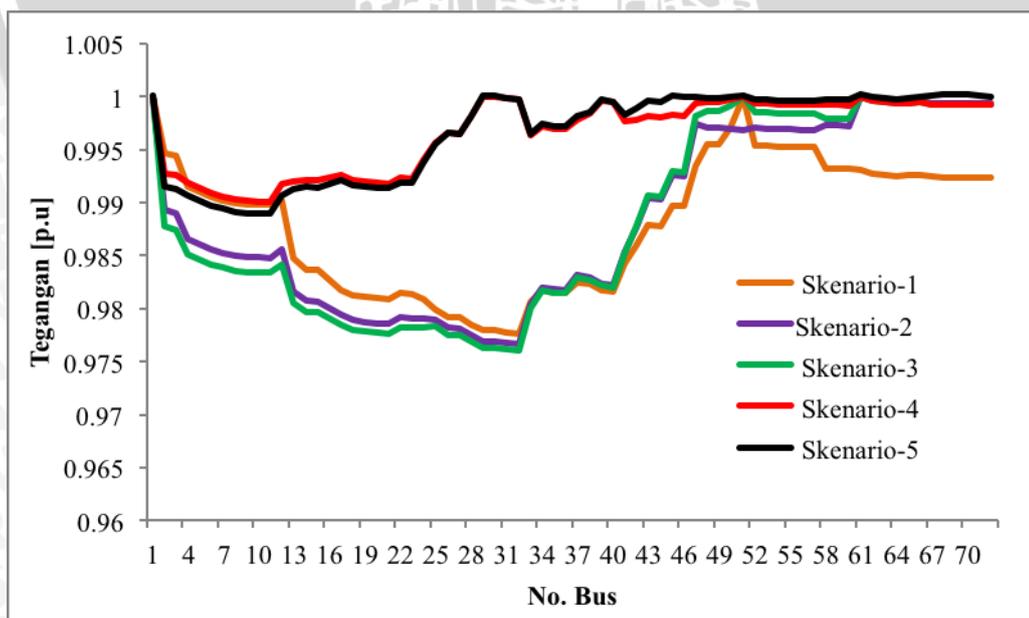
4.4.3.1 Kondisi Tegangan Bus Setelah Injeksi Daya

Tabel 4.10. Tegangan Bus Hasil Analisis Aliran Daya

Bus	V1	V2	V3	V4	V5
	p.u	p.u	p.u	p.u	p.u
	Skenario-1	Skenario-2	Skenario-3	Skenario-4	Skenario-5
1	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
2	0.995	0.989	0.988	0.993	0.991
3	0.994	0.989	0.987	0.993	0.991
4	0.992	0.987	0.985	0.992	0.991
5	0.991	0.986	0.985	0.991	0.990
6	0.991	0.986	0.984	0.991	0.990
7	0.990	0.985	0.984	0.991	0.989
8	0.990	0.985	0.984	0.990	0.989
9	0.990	0.985	0.983	0.990	0.989
10	0.990	0.985	0.983	0.990	0.989
11	0.990	0.985	0.983	0.990	0.989
12	0.990	0.986	0.984	0.992	0.991
13	0.985	0.982	0.980	0.992	0.991
14	0.984	0.981	0.980	0.992	0.991
15	0.984	0.981	0.980	0.992	0.991
16	0.983	0.980	0.979	0.992	0.992
17	0.982	0.979	0.978	0.993	0.992
18	0.981	0.979	0.978	0.992	0.992
19	0.981	0.979	0.978	0.992	0.991
20	0.981	0.979	0.978	0.992	0.991
21	0.981	0.979	0.978	0.992	0.991
22	0.981	0.979	0.978	0.992	0.992
23	0.981	0.979	0.978	0.992	0.992
24	0.981	0.979	0.978	0.994	0.994
25	0.980	0.979	0.978	0.996	0.995
26	0.979	0.978	0.978	0.997	0.996
27	0.979	0.978	0.977	0.996	0.996
28	0.978	0.977	0.977	0.998	0.998
29	0.978	0.977	0.976	1.000	1.000
30	0.978	0.977	0.976	1.000	1.000
31	0.978	0.977	0.976	1.000	1.000
32	0.978	0.977	0.976	1.000	1.000
33	0.981	0.980	0.980	0.996	0.996
34	0.982	0.982	0.982	0.997	0.997
35	0.981	0.982	0.981	0.997	0.997
36	0.981	0.982	0.981	0.997	0.997
37	0.982	0.983	0.983	0.998	0.998
38	0.982	0.983	0.983	0.998	0.999
39	0.982	0.982	0.982	1.000	1.000
40	0.982	0.982	0.982	0.999	0.999
41	0.984	0.985	0.985	0.998	0.998
42	0.986	0.988	0.988	0.998	0.999
43	0.988	0.990	0.991	0.998	1.000
44	0.988	0.990	0.990	0.998	0.999
45	0.990	0.993	0.993	0.998	1.000

Bus	V1	V2	V3	V4	V5
	p.u	p.u	p.u	p.u	p.u
	Skenario-1	Skenario-2	Skenario-3	Skenario-4	Skenario-5
46	0.990	0.992	0.993	0.998	1.000
47	0.993	0.997	0.998	0.999	1.000
48	0.995	0.997	0.999	0.999	1.000
49	0.995	0.997	0.999	0.999	1.000
50	0.997	0.997	0.999	1.000	1.000
51	1.000	0.997	1.000	1.000	1.000
52	0.995	0.997	0.998	0.999	1.000
53	0.995	0.997	0.998	0.999	1.000
54	0.995	0.997	0.998	0.999	1.000
55	0.995	0.997	0.998	0.999	1.000
56	0.995	0.997	0.998	0.999	1.000
57	0.995	0.997	0.998	0.999	1.000
58	0.993	0.997	0.998	0.999	1.000
59	0.993	0.997	0.998	0.999	1.000
60	0.993	0.997	0.998	0.999	1.000
61	0.993	1.000	1.000	1.000	1.000
62	0.993	1.000	1.000	1.000	1.000
63	0.993	1.000	0.999	0.999	1.000
64	0.992	0.999	0.999	0.999	1.000
65	0.993	0.999	0.999	0.999	1.000
66	0.993	1.000	0.999	0.999	1.000
67	0.992	0.999	0.999	0.999	1.000
68	0.992	0.999	0.999	0.999	1.000
69	0.992	0.999	0.999	0.999	1.000
70	0.992	0.999	0.999	0.999	1.000
71	0.992	0.999	0.999	0.999	1.000
72	0.992	0.999	0.999	0.999	1.000

(Sumber: Hasil Perhitungan)

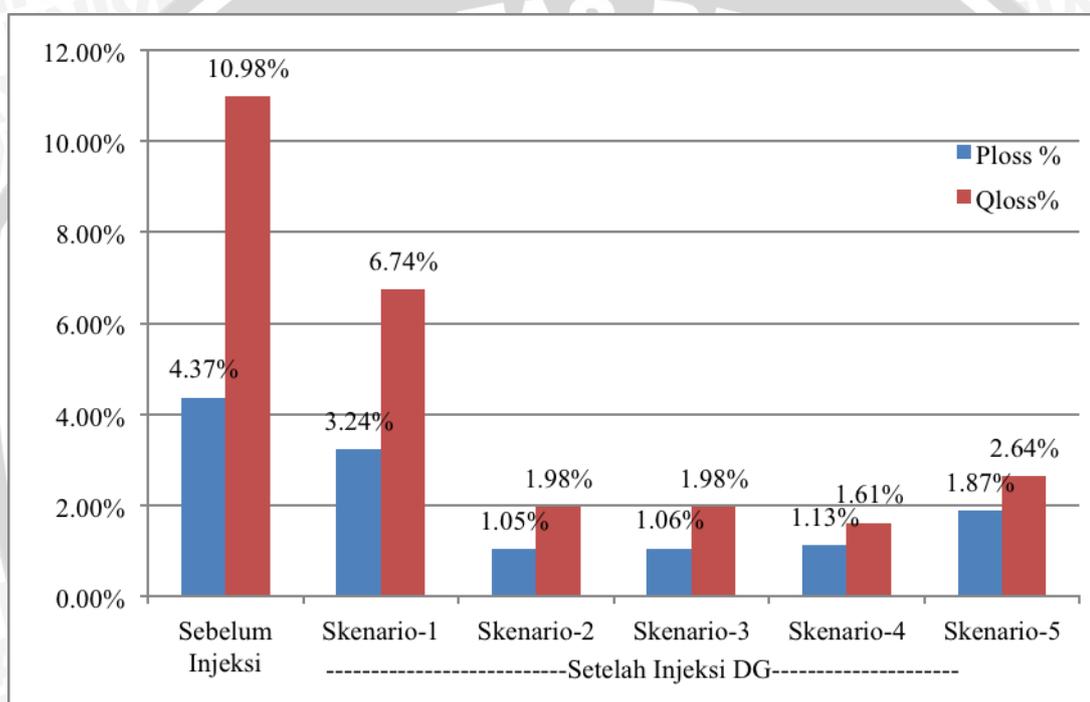


Gambar 4.3. Kurva Tegangan Bus Setiap Skenario.

4.4.3.2 Hasil Rugi-rugi Daya (*Losses*) Sesuai Skenario

Tabel 4.11. Rugi-rugi daya berdasarkan skenario 1-5.

Skenario	Pgen	Qgen	Pload	Qload	Ploss	Qloss	Ploss %	Qloss %
Sebelum Injeksi	3.9874	4.3702	3.81323	3.8904	0.17417	0.4798	4.37%	10.98%
Skenario-1	3.9408	4.17134	3.81323	3.8904	0.12757	0.28094	3.24%	6.74%
Skenario-2	3.8535	3.9689	3.81323	3.8904	0.04027	0.0785	1.05%	1.98%
Skenario-3	3.8539	3.9688	3.81323	3.8904	0.04067	0.0784	1.06%	1.98%
Skenario-4	3.8567	3.95426	3.81323	3.8904	0.04347	0.06386	1.13%	1.61%
Skenario-5	3.88609	3.99609	3.81323	3.8904	0.07286	0.10569	1.87%	2.64%



Gambar 4.4. Grafik Persentase Rugi-rugi Daya

4.5 Pembahasan

Dari hasil analisis aliran daya sebelum injeksi Pembangkit Tersebar pada saat kondisi beban maksimum didapatkan hasil penurunan tegangan sampai dengan -10% pada beberapa bus. Penurunan tegangan sebesar -10% dari tegangan nominalnya 20 kV merupakan kondisi kritis penyulang. Sesuai aturan jaringan Jawa Madura dan Bali (Permen ESDM No.03/2007), yaitu batas penurunan tegangan +5% dan -10%. Tegangan pada kondisi beban rata-rata dan minimum mengalami penurunan sebesar -6% dan -4%. Hal ini memperlihatkan kondisi tegangan jaringan masih berada pada kondisi normal. Hasil analisis aliran daya sebelum injeksi Pembangkit Tersebar

dilakukan menunjukkan besarnya rugi-rugi daya yang terjadi pada saat kondisi beban maksimum yaitu sebesar $0.1741 + j0.4798$ MVA atau sebesar 4% untuk daya aktif (P) dan 10.98% untuk daya reaktif (Q). Hasil analisis aliran daya juga menunjukkan besarnya rugi-rugi daya yang dihasilkan pada saat kondisi beban rata-rata dan minimum yaitu sebesar $0.058 + j0.1602$ MVA dan $0.0248 + j 0.0688$ MVA.

Hasil analisis aliran daya setelah injeksi Pembangkit Tersebar menunjukkan hasil terbaik berdasarkan lima (5) skenario yang telah ditetapkan. Level tegangan mengalami kenaikan yang cukup signifikan pada skenario-5 yaitu dimana Pembangkit Tersebar yang diinjeksikan berjumlah 6, secara berurutan masing-masing pada bus-bus 29, 45, 51, 39, 61, dan 69. Jumlah daya Pembangkit Tersebar yang diinjeksikan ke jaringan sesuai skenario 5 yaitu 0.9 MW untuk Generator 1, Generator 2, dan Generator 3, serta 3.06 MW untuk Generator 4, Generator 5, dan Generator 6. Kondisi tegangan pada skenario-5 hanya mengalami penurunan tegangan maksimal sebesar -1% dari tegangan nominalnya untuk semua bus. Naiknya level tegangan pada jaringan diiringi oleh penurunan rugi-rugi daya sampai dengan 1.87% untuk daya aktif (P) dan 2.64% untuk daya reaktif (Q) atau sebesar $P = 0.072$ MW dan $Q = 0.105$ Mvar.



BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Dari hasil analisis dan pembahasan mengenai penerapan pembangkitan tersebar pada penyulang Dampit Kabupaten Malang menunjukkan dampak yang signifikan terhadap naiknya profil tegangan untuk semua bus dan mengurangi rugi-rugi daya yang terjadi pada penyulang Dampit.

1. Dampak pada level tegangan; Skenario injeksi Pembangkit Tersebar yang diterapkan menunjukkan hasil terbaik pada skenario-5 yaitu level tegangan naik dari -10% menjadi -1% atau dari 0.90 p.u menjadi 0.99 p.u.
2. Dampak pada rugi-rugi daya; Skenario injeksi Pembangkit Tersebar yang diterapkan menunjukkan hasil terbaik pada skenario-2 yaitu besarnya rugi-rugi daya menurun dari $0.040 + j0.078$ MVA atau dari 4.37% menjadi 1.05% untuk daya aktif (P) dan 10.98% menjadi 1.98% untuk daya reaktif (Q).

5.2 Saran

Penerapan pembangkitan tersebar sangat bermanfaat untuk mengurangi besarnya rugi-rugi daya dan menaikkan profil tegangan pada penyulang. Penerapan Pembangkit Tersebar juga bermanfaat sebagai *backup* daya untuk kondisi beban maksimum. Peneliti mengalami kesulitan pada saat melakukan penentuan lokasi injeksi dan ukuran kapasitas daya Pembangkit Tersebar, oleh karena itu diusulkan untuk penelitian lanjutan mengenai penerapan Pembangkit Tersebar dibutuhkan proses optimasi dengan metode komputasi. Hal ini diusulkan agar mendapatkan hasil terbaik untuk menaikkan level tegangan dan mengurangi rugi-rugi daya yang terbaik sesuai aturan dan batasan teknisnya.



DAFTAR PUSTAKA

- Ackermann, T., Andersson, G., dan Soder, L. "Distributed generation: a definition", Elsevier, Electric Power Systems Research, no. 57, pp.195-204, 2001.
- Bawan, E.K., Hadi, S.P., & Sarjiya. 2011. Pengaruh Interkoneksi Distributed Generation Dalam Sistem Tenaga Listrik Terhadap Profil Tegangan. *Jurnal Teknologi*. VI (I):1-6.
- Bawan, E.K., "Dampak Pemasangan Distributed Generation Terhadap Rugi-Rugi Daya", *Jurnal Ilmiah Foristek*, 2012, vol. 2 no. 21.
- Belly, A., dkk., 2010, "Daya Aktif, Reaktif, dan Nyata", Tugas Makalah Mata Kuliah Teknik Tenaga Listrik Program Studi Teknik Elektro UI Jakarta.
- Cekdin, Cekmas. 2010. *Sistem Tenaga Listrik-Contoh Soal dan Penyelesaian Menggunakan Matlab*. Yogyakarta : Andi.
- Dahono, P.A., 2008 "Pembangkit Listrik Energi Terbarukan" "<http://konversi.wordpress.com/2008/11/03/pembangkit-listrik-energi-terbarukan/>" Akses tanggal 20 Mei 2014.
- Gupta, B.R., 1998., *Power System Analysis and Design*, A.H. Wheeler & Co. Ltd., New Delhi.
- Haesen, E.; Espinoza, M.; Pluymers, B.; *Optimal placement and sizing of distributed generator units using genetic optimization algorithms, Electrical Power Qual. Util. J.11 (2005) 1452-1458.*
- Hasan, H. Perancangan Pembangkit Listrik Tenaga Surya di Pulau Saugi. *Jurnal Riset dan Teknologi Kelautan(JRTK)*. X (1):169-180.
- Hasan, H., "Perancangan Pembangkit Listrik Tenaga Surya di Pulau Saugi", *Jurnal Riset dan Teknologi Kelautan (JRTK)*, 2012, vol. 10 no. 2.
- Hasannuddin, T., 2010, "Analisa Tanggapan Frekuensi Akibat Masuknya *Distributed Generation* Pada Sistem Interkoneksi Jamali" "http://jurnal.pnl.ac.id/wp-content/plugins/Flutter/files_flutter/13654019273.JurnalT.Hasanuddin.pdf" Akses tanggal 14 April 2014.
- Harun, E.H., 2012 "Analisis Tegangan Setiap Bus Pada Sistem Tenaga Listrik Gorontalo Melalui Simulasi Aliran Daya" "<http://ejurnal.ung.ac.id/index.php/ST/article/download/1155/941>" Akses tanggal 10 April 2014.
- Harun, N. 2011. *Bahan Ajar Perancangan Pembangkitan Tenaga Listrik*. Makassar: Universitas Hasanuddin.
- Kementerian Negara Ristek R.I. "Penelitian, Pengembangan, dan Penerapan Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Bidang Sumber Energi Baru dan Terbarukan Untuk

- Mendukung Keamanan Ketersediaan Energi Tahun 2025". Buku Putih Indonesia 2005-2025, Jakarta: 2006.
- Kementerian ESDM R.I. "Harga Pembelian Tenaga Listrik oleh PT PLN (Persero) dari Pembangkit Tenaga Listrik Yang Menggunakan Energi Terbarukan Skala Kecil dan Menengah atau Kelebihan Tenaga Listrik" Peraturan Menteri (Permen) No. 4. 2012.
- Kementerian ESDM R.I. "Harga Pembelian Tenaga Listrik oleh PT PLN (Persero) dari Pembangkit Tenaga Listrik Yang Menggunakan Energi Terbarukan Skala Kecil dan Menengah atau Kelebihan Tenaga Listrik" Peraturan Menteri (Permen) No. 31. 2009.
- Kementerian ESDM R.I. "Aturan Jaringan Sistem Tenaga Listrik Jawa-Madura-Bali" peraturan menteri (permen) No. 3. 2007.
- Knazkin, V., 2004, "*Stability of power systems with large amounts of distributed generation*" "Dissertation, KTH Institution for Elektrotekniska System" <http://kth.diva-portal.org/smash/get/diva2:13034/FULLTEXT01>" Akses tanggal 24 April 2014.
- Kundur, P. 1994. *Power System Stability and Control*. New York : McGraw-Hill.
- Mithulananthan, N., Oo, T., & Phu, L.V., "*Distributed generator placement in power distribution system using genetic algorithm to reduce losses*", *Thammasat International Journal of Science and Technology Journal*, 2004, vol. 9 no. 3.
- Mujiman, & Santosa, B., 2011, "Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTM)" "<http://elektro.um.ac.id/seie2011/wp-content/uploads/national/electrical/A1-9.pdf>" Akses tanggal 14 April 2014.
- Muljono, A.B & Nrartha, I.M. Analisis Pengaruh Unit Pembangkit Tersebar Terhadap Stabilitas Dinamis Sistem Tenaga. *Jurnal Teknologi Elektro* Vol. 8 No. 1 Januari-Juni 2009.
- Presiden R.I "Kebijakan Energi Nasional". Peraturan Presiden Republik Indonesia No. 5 Tahun 2006.
- Quezada, V.H.M.; Abbad, J.R.; & San Román, T.G.; *Assessment of Energy Distribution Losses for Increasing Penetration of Distributed Generation*, *IEEE Transactions On Power Systems*, 2006, vol. 21 no. 2.
- Robert, H. Milner & James, H. Malinowski. 1994. *Power System Operation*. New York : McGraw-Hill.
- Saadat, Hadi. *Power System Analysis*. New York : McGraw-Hill Book Company, 1999.
- Saribu, P.D., 2008, "Pengaruh distributed generation terhadap keandalan sistem distribusi", Tesis Program Pascasarjana Program Studi Teknik Elektro UGM Yogyakarta.

- Seker A.A & Hocaoglu M.H. Renewable resource based DG-unit allocation in distribution Systems. Turkey : Gebze Institute of Technology- Department of Electronics Engineering, 2013.
- Siregar, D., 2011, "Studi Pemanfaatan Distributed Generation (DG) Pada Jaringan Distribusi"
"<http://repository.usu.ac.id/bitstream/123456789/31916/2/Chapter%20III-V.pdf>"
Akses tanggal 14 April 2014.
- Stevenson, William D., Granger, John J., 1994., *Power System Analysis.*, McGraw-Hill International Edition., New York.
- Sudirham, Sudaryatno. Analisis Rangkaian Listrik. *Bandung*: 2012.
- Supardi, A. & Prabowo, R. Analisis Dampak Pemasangan *Distributed Generation (DG)* Terhadap Profil Tegangan Dan Rugi-Rugi Daya Sistem Distribusi Standar Ieee 18 Bus. Universitas Muhammadiyah Surakarta, 2012.
- Thong, V. V., Driesen, J., Belmans, R., 2005, "Interconnection of Distributed Generators and Their Influences on Power Sytem", *International Energy Journal Vol.6, No.1 Part 3, Belgium*.
- Tiyono, S., 2013, "Pembangkit Listrik Tenaga Air" "<http://godamaiku.blogspot.com/2013/01/pembangkit-listrik-tenaga-air.html>" Akses tanggal 15 April 2014.
- Wijaya, R.H., Adi Soeprijanto, A., & Suryoatmojo, H., "Penempatan dan Penentuan Kapasitas Optimal dari *Distributed Generation (DG)* dengan Mempertimbangkan *Maximum Loadability* Menggunakan *Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm-II (NSGA-II)*" "<http://digilib.its.ac.id/public/ITS-Undergraduate-19227-Paper-2049959.pdf>" Akses tanggal 10 April 2014.